

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ NESTABILNÍHO PODVOZKU MOBILNÍHO  
ROBOTU**  
Bc. Tomáš Kadlec

Diplomová práce

2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Kadlec**  
Osobní číslo: **I12516**  
Studijní program: **N2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Název tématu: **Konstrukce a řízení nestabilního podvozku mobilního robotu**  
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je návrh konstrukce, jeho realizace a řízení nestabilního podvozku mobilního robotu. Bude realizován návrh mechanické konstrukce a elektronické řídicí jednotky podvozku. Podvozek bude realizován jako dvoukolový (typu "Seegway") a řídicí jednotka bude realizována jednočipovým mikropočítačem ATmel řady ATmega. Řídicí jednotka bude stabilizovat polohu nestabilního podvozku a umožňovat pohyb podvozku po předem stanovené trajektorii. Teoretická část:

V teoretické části bude provedena rešerše zadaného tématu, rozbor principu použitých snímačů a akčních členů použitých v aplikaci. Dále bude provedena volba vhodného typu řídicího mikropočítače.

Implementační část:

Bude proveden návrh mechanického řešení zařízení a elektronické řídicí jednotky. Dále bude následovat popis realizace návrhu a tvorba příslušného řídicího software. Závěrem bude provedeno ověření funkce realizovaného zařízení jeho testováním, s prezentací jeho výsledků.

Požadavky na studenta:

Znalost návrhu a realizace mechanického a elektronického systému a programování jednočipových mikropočítačů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ, M.(2004) Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Vydavatelství ČVUT Praha, 2004.**

**MIKLEŠ, J., FIKAR, M. (2004) Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov 2. Identifikácia a optimálne riadenie. STU v Bratislave, 2004.**

**MATOUŠEK DAVID(2006) Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - 3.díl edice uP a praxe 2.vydání, BEN technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4.**

**PLÍVA ZDENĚK (2010) Eagle Prakticky, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-252-7.**

**ZÁHLAVA VÍT (2010) Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

**30. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**16. května 2014**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5. 2014.

---

Bc. Tomáš Kadlec

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D., za poskytnuté odborné rady a připomínky během zpracování této závěrečné práce a dále všem ostatním lidem, kteří mě podporovali.

V Pardubicích dne 15. 5. 2014.

---

Bc. Tomáš Kadlec

## **ANOTACE**

*Cílem této Diplomové práce je navrhnout a zkonstruovat autonomního dvoukolového balančního robota. Tento typ robota pro jeho přirozenou nestabilitu je vhodný pro testování řídicích a stabilizačních algoritmů. Navržený řídicí systém pro nestabilní podvozek balančního robota je realizován diskrétní řídicí jednotkou, akčními členy a inerciální měřicí jednotkou složenou z akcelerometru a gyroskopu. Na fyzickém modelu robota byl otestován řídicí a stabilizační algoritmus a bylo dosaženo pozitivních výsledků. Takto navržený systém nabízí řadu uplatnění pro budoucí rozvoj v této problematice.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*stabilizace, regulace, IMU, PID regulátor, inverzní kyvadlo.*

## **TITLE**

*CONSTRUCTION AND CONTROL OF UNSTABLE MOBILE ROBOT CHASSIS*

## **ANNOTATION**

*The aim of the diploma thesis is to design and construct a two-wheeled autonomous balancing robot. Due to natural instability this type of robot is suitable for testing stability and control algorithms. The proposed control system for an unstable chassis of a balancing robot is realized by a discrete control unit, actuators and an inertial measurement unit consisting of an accelerometer and a gyroscope. The physical model of the robot was tested by stabilization a control algorithm, and positive results were achieved. This proposed system offers many applications for future development in this area.*

## **KEYWORDS**

*stabilization, regulation, IMU, PID regulator, inverse pendulum.*

# OBSAH

Seznam zkratek .....	10
Seznam symbolů .....	11
Seznam obrázků .....	12
Seznam tabulek .....	15
ÚVOD .....	16
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	17
1.1 Rešerše .....	17
1.1.1 Balanduino .....	17
1.1.2 Segway PT .....	18
1.1.3 Equibot .....	18
1.1.4 Hodnocení rešerše .....	18
1.2 Matematický model (Matematicko-fyzikální analýza) .....	19
1.3 Návrh řídicího systému .....	22
1.3.1 Výpočet náklonu pomocí akcelerometru .....	23
1.3.2 Výpočet náklonu pomocí gyroskopu .....	23
1.4 Regulace .....	24
1.4.1 PID regulátor .....	25
1.4.2 Nastavení PID Ziegler-Nicholsovou metodou .....	27
1.5 Diskrétní regulace .....	27
1.5.1 PSD regulátor .....	28
1.6 Filtrování dat .....	30
1.6.1 Aritmetický průměr dat .....	30
1.6.2 Klouzavý průměr .....	30
1.6.3 Kálmánův filtr .....	31
1.6.4 Komplementární filtr .....	33
1.7 Akcelerometr .....	34
1.7.1 Typy akcelerometrů .....	34
1.8 Gyroskop .....	36
1.8.1 Mechanický gyroskop .....	36
1.8.2 Optický gyroskop .....	37
1.8.3 Jaderný gyroskop .....	38

1.8.4	Elektrický gyroskop .....	38
1.8.5	Kvantový gyroskop .....	39
1.9	PWM modulace.....	39
1.10	H můstek.....	40
1.11	Stejnoseměrný motor.....	41
1.11.1	Řízení diferenciálního podvozku se stejnosměrnými motory .....	43
1.12	Ultrazvukový senzor.....	43
2	PRAKTICKÁ ČÁST .....	45
2.1	Realizace robota .....	45
2.2	Použité prvky pro stabilizaci.....	46
2.2.1	Řídicí jednotka .....	46
2.2.2	Akcelerometr MMA 7361 .....	48
2.2.3	Gyroskop GY 521 .....	50
2.2.4	Akumulátor.....	50
2.2.5	H můstek.....	51
2.2.6	Stejnoseměrný motor .....	53
2.2.7	Kola robota .....	54
2.2.8	Ultrazvukový senzor HC-SR04.....	54
2.2.9	Schéma zapojení prvků .....	55
2.3	Výsledná konstrukce robota.....	56
2.4	Filtrace dat.....	56
2.4.1	Kálmánova filtrace .....	56
2.4.2	Komplementární filtr.....	58
2.5	Algoritmus regulace .....	59
2.5.1	Algoritmus balancování .....	60
2.5.2	Algoritmus jízdy.....	62
2.6	Nastavení regulátoru .....	65
2.6.1	Testování balančního algoritmu s PSD regulátorem.....	65
2.7	Použití robota .....	67
2.7.1	Hlídací robot.....	67
2.7.2	Robot v domácnosti.....	67
2.7.3	Prohledávací robot.....	67



2.7.4 Požární robot .....	68
3 ZÁVĚR .....	69
Seznam použité literatury .....	71
Příloha A – Zdrojový kód .....	A - 1
Příloha B – Schéma Arduino Uno .....	B - 1
Příloha C – CD.....	C - 1

## Seznam zkratk

ATMEGA	Osmi-bitový mikrokontrolér
DC	Stejnoseměrný proud
GND	Uzemnění
IMU	Inerciální měřicí jednotka
MEMS	Mikro-mechanicko-elektronická struktura
N/C	Nepřipojeno
PID	Proporcionálně-integračně-derivační regulátor
PSD	Proporcionálně-sumačně-diferenční regulátor
PWM	Pulzně šířková modulace
R	Regulátor
RX	Přijímač
S	Regulovaná soustava
TX	Vysílač
VCC	Napájecí napětí

## Seznam symbolů

$e(t)$	Regulační odchylka systému
$I$	Elektrický proud, A
$R$	Elektrický odpor, $\Omega$
$r_{0k}$	Kritické zesílení
$T$	Vzorkovací perioda, s
$t$	Čas, s
$T_D$	Derivační konstanta regulátoru
$T_I$	Integrační konstanta regulátoru
$T_k$	Kritická perioda kmitů, s
$U$	Elektrické napětí, V
$u(t)$	Akční veličina systému
$w(t)$	Žádaná hodnota systému
$y(t)$	Výstupní hodnota systému (měřená hodnota)

## Seznam obrázků

Obr. 1.1 – Balanduino .....	17
Obr. 1.2 – Equibot.....	18
Obr. 1.3 – Segway PT .....	18
Obr. 1.4 – Stabilita robota.....	19
Obr. 1.5 – Fyzikální princip inverzního kyvadla s posuvnou základnou .....	20
Obr. 1.6– Ideové schéma řídicího systému.....	22
Obr. 1.7 – Stupně volnosti robota .....	22
Obr. 1.8 – Výpočet pomocí akcelerometru .....	23
Obr. 1.9 – Schéma jednoduchého uzavřeného regulačního obvodu.....	24
Obr. 1.10 – Zpětná vazba.....	25
Obr. 1.11 – Přímá vazba .....	25
Obr. 1.12 – Schéma paralelního PID regulátoru.....	26
Obr. 1.13 – Přechodové charakteristiky PID regulátoru (NĚMEC, 2002).....	26
Obr. 1.14 – Identifikace kritické periody.....	27
Obr. 1.15 – Diskrétní signál.....	28
Obr. 1.16 – Spojitý signál .....	28
Obr. 1.17 – Schéma diskrétního řídicího systému (NĚMEC, 2002) .....	28
Obr. 1.18 – Aproximace lichoběžníkovým pravidlem .....	29
Obr. 1.19 – Diference .....	29
Obr. 1.20 – Aritmetický průměr .....	30
Obr. 1.21 – Klouzavý průměr .....	31
Obr. 1.23 – Gaussovo rozdělení.....	32
Obr. 1.22 – Koncept Kálmánovi filtrace (KALMAN FILTER, 2001).....	32
Obr. 1.24 – Komplementární filtr .....	33
Obr. 1.25 – Akcelerometr .....	34
Obr. 1.26 – Princip akcelerometru s proměnou kapacitou (ŠTEFL, 2012.).....	36
Obr. 1.27 – Mechanický gyroskop (GYROSKOP, 2008) .....	37
Obr. 1.28 – Elektrický gyroskop (ELEKTRICKÝ GYROSKOP, 2012) .....	38
Obr. 1.29 – Princip Coriolisovy síly (VOJÁČEK, 2006).....	39
Obr. 1.30 – Průběhy PWM modulace pro různou střídu .....	40

Obr. 1.31 – Schéma H můstku .....	40
Obr. 1.32 – Princip funkce stejnosměrného motoru .....	41
Obr. 1.33 – Náhradní elektrické schéma motoru (NOVÁK, 2005).....	42
Obr. 1.34 – Diferenciální řízení podvozku .....	43
Obr. 1.35 – Princip ultrazvukového senzoru .....	44
Obr. 2.1 – Schéma balančního robota.....	45
Obr. 2.2 – Blokové schéma řídicího systému .....	46
Obr. 2.3 – Arduino Uno .....	47
Obr. 2.4 – Akcelerometr MMA7361 .....	48
Obr. 2.5 – Schéma pinů akcelerometru.....	49
Obr. 2.6 – Schéma zapojení akcelerometru k mikrokontroléru .....	49
Obr. 2.7 – Gyroskop GY 521.....	50
Obr. 2.8 – Akumulátor.....	51
Obr. 2.9 – Akumulátorový alarm.....	51
Obr. 2.10 – H můstek.....	52
Obr. 2.11 – Schéma H můstku.....	52
Obr. 2.12 – Stejnosměrný motor s převodovkou .....	53
Obr. 2.13 – Kolo robota .....	54
Obr. 2.14 – Unašeč hřídele .....	54
Obr. 2.15 – Ultrazvukový senzor HC-SR04 .....	55
Obr. 2.16 – Schéma zapojení řídicího systému .....	55
Obr. 2.17 – Realizace balančního robota .....	56
Obr. 2.18– Kálmánova filtrace akcelerometru.....	57
Obr. 2.19 – Kálmánova filtrace gyroskopu.....	57
Obr. 2.20 – Nastavení parametru a komplementárního filtru .....	58
Obr. 2.21 – Výsledná data z komplementárního filtru .....	59
Obr. 2.22 – Vývojový diagram algoritmu balancování .....	60
Obr. 2.23 – Realizace PSD algoritmu jazykem C.....	61
Obr. 2.24 – Řízení PWM modulací Arduino .....	61
Obr. 2.25 – Maximální hodnota akčního zásahu .....	61
Obr. 2.26 – Vývojový diagram algoritmu jízdy.....	63
Obr. 2.27 – Realizace otáčení robota v jazyce C pro Arduino .....	64

Obr. 2.28 – Autonomní pohyb robota v prostoru .....	64
Obr. 2.29 – Výstup reálné soustavy pro nastavení PSD regulátoru.....	65
Obr. 2.30 – Záznam o balancování robota.....	66

## Seznam tabulek

Tab. 1.1 – Fyzikální veličiny popisu kyvadla .....	20
Tab. 1.2 – Nastavení parametrů PID regulátoru .....	27
Tab. 1.3 – Řízení motoru .....	41
Tab. 2.1 – Popis funkce pinů desky Arduino Uno .....	48
Tab. 2.2 – Konstanty PSD regulátoru .....	65

## ÚVOD

S rozvojem výpočetních systémů a teorie řízení systémů vznikl v polovině 20. století nový vědní obor robotika, který se zabývá možností rozvoje a řízení komplexních elektronických a mechanických systémů. Hybnou silou pro vývoj v oblasti dnešních robotických systémů je dostupnost a nízká cena elektronických komponent pro stavbu a vývoj robotů.

Tato práce se zabývá návrhem mechanické konstrukce a řídicího systému dvoukolového nestabilního podvozku, balančního robota. Tato koncepce robota je velmi podobná modelu inverzního kyvadla s mobilní základnou, který je známým příkladem nestabilního fyzikálního systému se stabilitou pouze v jedné poloze, tedy v poloze kolmé na horizontální osu kyvadla. Navržením dostatečně robustního řídicího systému se spolehlivým algoritmem regulace, na základě zpětnovazebního regulačního obvodu s informací o stavu systému, snímaným sensorickým subsystémem, by měl být řídicí stabilizační systém schopen úspěšné regulace polohy nestabilního podvozku.

Pro tuto práci budou potřebné znalosti teorie regulace dynamických soustav, návrhu a konstrukce elektronických řídicích systémů, spolu s návrhem pokročilých automatických regulátorů a s využitím polohových senzorů.



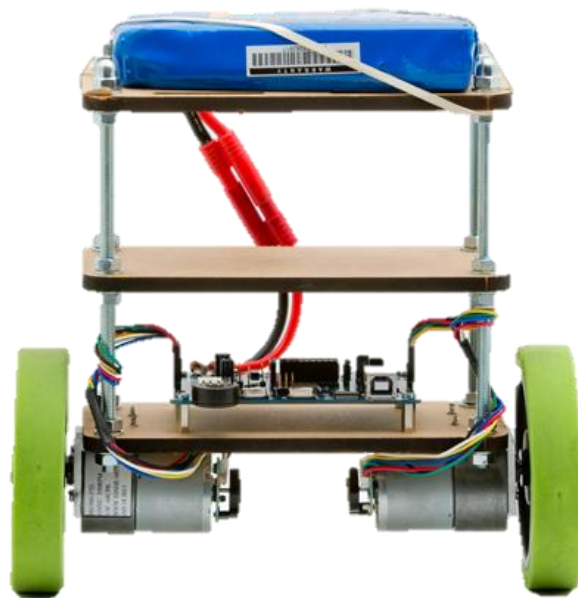
# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Rešerše

V následující kapitole je přehled několika současných konstrukčních řešení stabilizačního řídicího systému dvoukolového balančního robota. Stěžejním úkolem pro tuto práci bude získat přehled použitých metod konstrukce, návrhů řídicích algoritmů, použitých senzorů a hardwaru, potřebných pro stabilizaci dvoukolového podvozku.

### 1.1.1 Balanduino

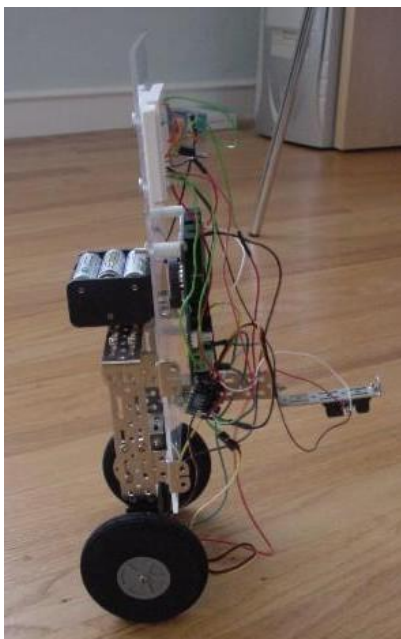
Balanduino na obr. 1.1 je komerčně vyráběný dvoukolový balanční robot od firmy TKJ electronics. Robot je řízen mikroprocesorem ATmega 1284P, který zpracovává řídicí algoritmus. Sensorický systém je tvořen gyroskopem určujícím úhlovou rychlost vychýlení vertikální osy a akcelerometrem určujícím aktuální regulační odchylku tedy úhel vychýlení od stabilní vertikální osy. Výchylky od vertikální osy jsou v mikrokontroléru vyhodnoceny a zpracovány algoritmem PID regulátoru na akční zásah, jenž je přiveden jako výkonový elektrický signál pro dva stejnosměrné motory zajišťující stabilizaci polohy těla robota. Celý systém je velice dobře propracovaný (LAUSZUS, 2013).



Obr. 1.1 – Balanduino

### 1.1.2 Segway PT

Jedná se o komerčně vyráběný robot na principu stabilizování inverzního kyvadla, používaný pro přepravu osob. Dopravní prostředek Deana Kamena používá pro udržení stability celkem pět gyroskopů (kvůli redundanci) a dva kapalinové inklinometry snímajících náklon kol vůči ose robota. Pohyb robota se ovládá přenášením váhy pasažéra dopředu a vzad, zatačení je ovládáno vychýlením řídicích (SEGWAY, 2012).



Obr. 1.2 – Equibot



Obr. 1.3 – Segway PT

### 1.1.3 Equibot

Projekt Equibot, jehož autorem je Dan Piponi se značně odlišuje od všech předchozích projektů v přístupu k senzorické soustavě. Princip balancování je založen na přesné znalosti geometrie robota a na infračerveném senzoru, který měří vzdálenost vrcholu robota od podlahy, při náklonu robota se změní tato vzdálenost a z ní se vypočte úhel vychýlení. Algoritmus s PI regulátorem z této vzdálenosti určí akční zásah pro stabilizování robota (PIPONI, 2011).

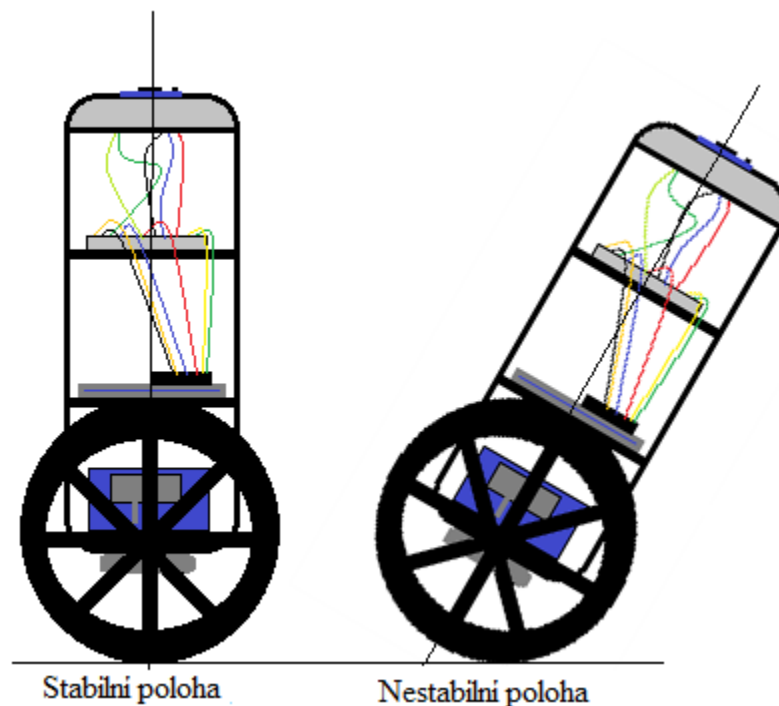
### 1.1.4 Hodnocení řešerše

Projekt Segway a Balanduino jsou velice dobře propracované, jelikož se jedná o komerčně prodávané roboty. Ostatní projekty jsou spíše stále ve fázi vývoje a zlepšování. Nejrozšířenějším způsobem, jak řídit balančního robota, nebo jakékoliv inverzní kyvadlo je pomocí inklinometrů, které přímo snímají náklon robota. Dalším používaným způsobem je

pomocí akcelerometru a gyroskopu, které udávají úhel naklonění pomocí rozložení gravitačního zrychlení do horizontální a vertikální osy. Tento způsob je snadno realizovatelný pomocí MEMS senzorů. Obtížným může být návrh samotného algoritmu pro stabilizaci a nastavení diskrétního regulátoru. Regulátor i algoritmus musí být velice pečlivě a přesně navržen, aby nedocházelo k destabilizaci systému, resp. aby byl systém plynule stabilizován a nedocházelo k nežádanému pádu robota.

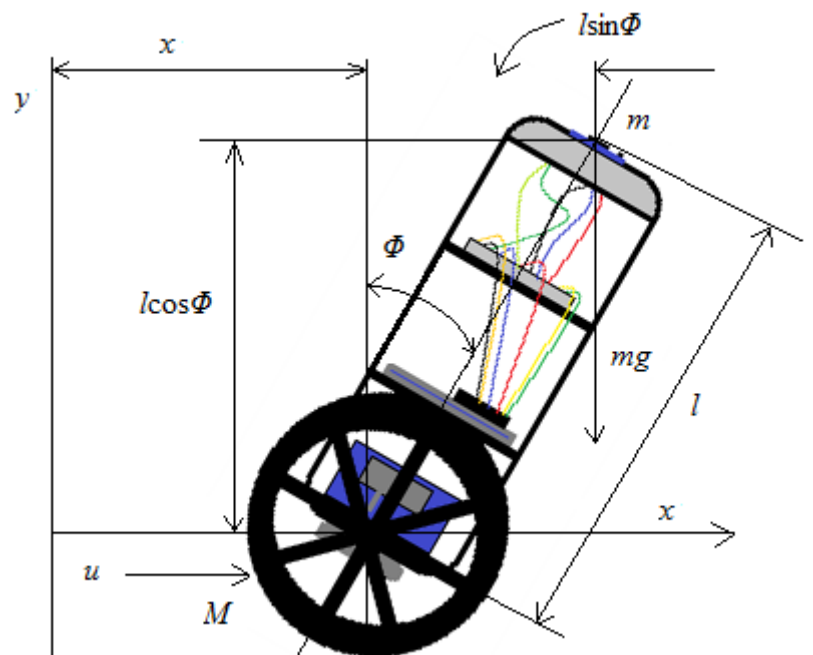
## 1.2 Matematický model (Matematicko-fyzikální analýza)

Model balančního robota na obr. 1.4 má dvě možné polohy, základem regulace pro tento model bude docílení stabilní polohy robota z jakékoli nestabilní polohy v rámci fyzikálních a technických omezení.



Obr. 1.4 – Stabilita robota

Pro matematický model lze balančního robota zjednodušit na příklad inverzního kyvadla s posuvnou základnou na obr. 1.5. Uvedením ramene kyvadla do stavu rovnováhy ve vertikální poloze, tedy kolmo na horizontální osu robota je dosažena stabilita systému. Samotný řídicí systém vyhodnocuje vychýlení robota a pohybem základny stabilizuje systém.



Obr. 1.5 – Fyzikální princip inverzního kyvadla s posuvnou základnou

Tab. 1.1 – Fyzikální veličiny popisu kyvadla

Veličiny	Jednotky	Popis
$L$	-	Lagrangeova funkce
$E_K$	J	Kinetická energie
$E_P$	J	Potenciální energie
$l$	m	Délka kyvadla
$m$	kg	Hmotnost kyvadla
$\Phi$	°	Úhel kyvadla
$\Phi'$	°/s	Úhlová rychlost kyvadla
$\Phi''$	°/s <sup>2</sup>	Úhlové zrychlení kyvadla

Při modelování inverzního kyvadla jsou použity Lagrangeovy funkce, které popisují soustavu pomocí kinetické a potenciální energie:

$$L = E_K - E_P \quad (1.1)$$

Pohybovou rovnicí derivujeme pomocí Eulerovy-Lagrangeovy rovnice:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \phi'} \right) = \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (1.2)$$

Definování počátku souřadného systému:

$$x = L\sin(\theta) \rightarrow x' = L\cos(\theta)\theta' \quad (1.3)$$

$$y = L\cos(\theta) \rightarrow y' = -L\sin(\theta)\theta' \quad (1.4)$$

Rychlost systému lze vyjádřit jako:

$$v^2 = x'^2 + y'^2 = L^2\theta'^2(\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)) = L^2\theta'^2 \quad (1.5)$$

Dosazením kinetické a potenciální energie do Lagrangeovy funkce získáme:

$$L = \frac{1}{2}mv^2 - mgy \quad (1.6)$$

$$L = \frac{1}{2}mL^2\theta'^2 - mgL\cos(\theta) \quad (1.7)$$

Do rovnice (1.2) dosadíme a vyjádříme úhlové zrychlení  $\ddot{\theta}$ :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta'} = 0 + mgL\sin(\theta) = mgL\sin(\theta) \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = mgL^2\theta'^2 - 0 = mL^2\theta' \quad (1.9)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \theta'} \right) = mL^2\theta'' \quad (1.10)$$

Rovnice (1.9) a (1.10) dosadíme do (1.2) a získáme rovnici (1.11), která udává úhlovou rychlost vznikající působícím gravitačním zrychlením na rameno kyvadla:

$$mL^2\theta'' = mgL\sin(\theta) \rightarrow \theta'' = \frac{g}{L}\sin(\theta) \quad (1.11)$$

Pro snadnější modelování jsou zavedeny zjednodušující předpoklady, zejména pro chování elektronických a mechanických prvků:

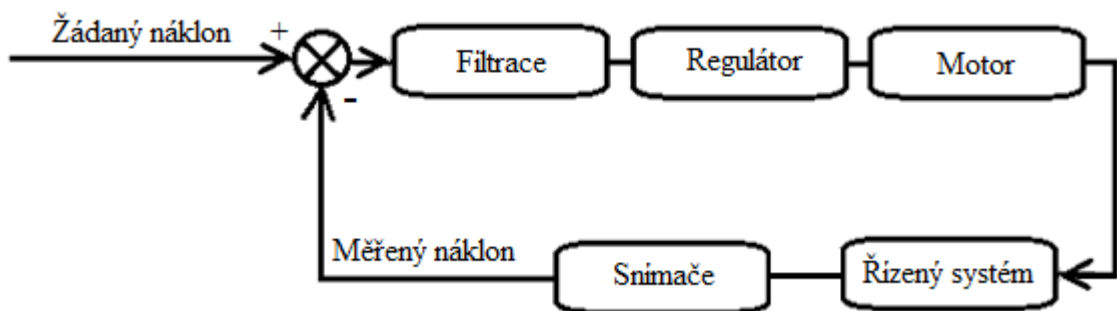
- Úhlová rychlost při náklonu těla robota je nízká, a proto je dostředivá síla působící při kruhovém pohybu zanedbána.
- Kola robota neprokluzují na pevné podložce a nevznikají tak žádné ztráty.

- Elektronické a mechanické ztráty jsou minimální a můžeme je považovat za nulové.
- Zanedbáme dynamiku elektronického systému.
- Linearizujeme systém v rovnovážném bodě.

Kapitola čerpána z (JEREMIC, 2012).

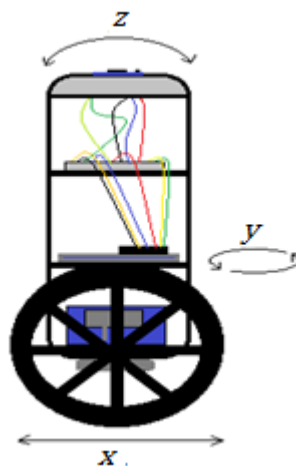
### 1.3 Návrh řídicího systému

Řídicí systém je realizován mikrokontrolérem a senzorickým subsystémem, připojeným k mikrokontroléru, ve kterém probíhá řídicí algoritmus regulace a stabilizace za pomoci záporné zpětné vazby a výpočtu akčního zásahu diskretním regulátorem. Tímto zásahem na obr. 1.6 přivedeným na svorky motoru se dosáhne stability balančního robota tzv. balancování okolo žádané hodnoty systému.



Obr. 1.6– Ideové schéma řídicího systému

Balanční robot má tři stupně volnosti, dva pro pohyb robota v prostoru tedy přímý pohyb robota vpřed a vzad označen jako osa  $x$  na obr. 1.7, druhý pro otáčení těla robota



Obr. 1.7 – Stupně volnosti robota

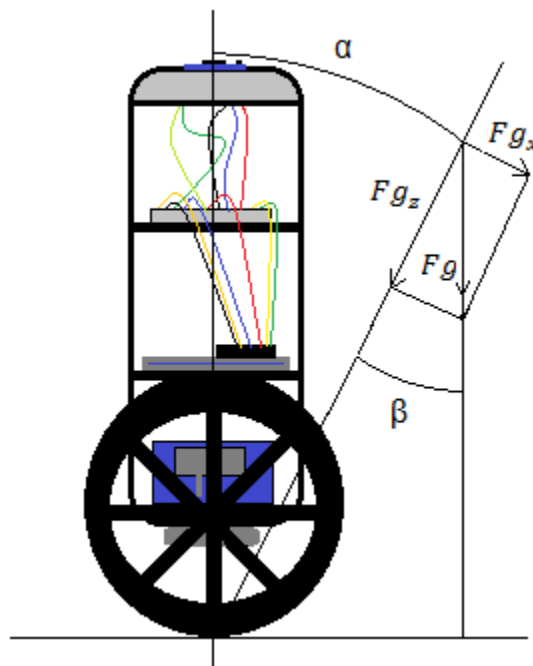
v prostoru a změnu směru jeho pohybu v ose  $y$ . Tyto dva stupně volnosti umožňují všesměrový pohyb ve 2D prostoru. Třetím pro tuto práci stěžejním stupněm volnosti je náklon těla v ose  $z$  robota od stabilní vertikální osy, tento pohyb musí být pro stabilitu robota regulován na úhel náklonu  $0^\circ$ .

### 1.3.1 Výpočet náklonu pomocí akcelerometru

Akcelerometr měří gravitační zrychlení v ose  $x$  a  $z$ , osy jsou na sebe vzájemně kolmé. Při otáčení akcelerometru se gravitační zrychlení promítá na obě osy, a proto lze pomocí goniometrických znalostí vypočítat úhel  $\alpha$ .

$$\beta = \arctan\left(\frac{Fg_x}{Fg_z}\right) \quad (1.12)$$

Z obr. 1.8 je patrné, že úhel  $\alpha$  je stejný jako úhel  $\beta$ .



Obr. 1.8 – Výpočet pomocí akcelerometru

### 1.3.2 Výpočet náklonu pomocí gyroskopu

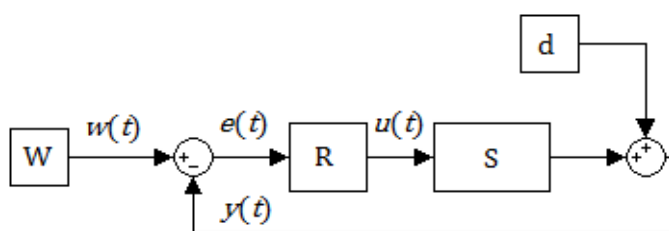
Gyroskop snímá rotaci kolem měřené osy, kterou převádí na úhlovou rychlost  $\omega(t)$ . Úhlová rychlost je první derivací úhlu natočení  $\theta$  (1.13), tedy zpětně je úhel natočení integrálem naměřené úhlové rychlosti (1.14).

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.13)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (1.14)$$

## 1.4 Regulace

Pro stabilizaci robota je velice důležité regulovat soustavu na žádanou hodnotu tedy nulový náklon od stabilní rovnovážné polohy. V teorii řízení hovoříme o uzavřeném regulačním obvodu, který se skládá z regulované soustavy označené S na obr. 1.9 a regulátoru R. Regulovaná soustava často vyjádřená jako přenos (poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny ku Laplaceovu obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách) představuje dynamické vlastnosti regulovaného systému s regulovaným vstupem  $u(t)$  a měřeným výstupem  $y(t)$ . Regulace vyžaduje vyregulování výstupu soustavy na žádanou hodnotu obr. 1.9 blok W, tedy při správné regulaci by měl být v ustáleném stavu a po odeznění počátečních podmínek výstup soustavy shodný s žádanou hodnotou. Regulátor vypočítá na základě regulační odchylky  $e(t)$  aktuální akční zásah  $u(t)$ , který je přiveden na vstup soustavy. Regulační odchylka  $e(t)$  vychází ze zapojení záporné zpětné vazby výstupu  $y(t)$  k žádané hodnotě  $w(t)$  rovnice (1.15).



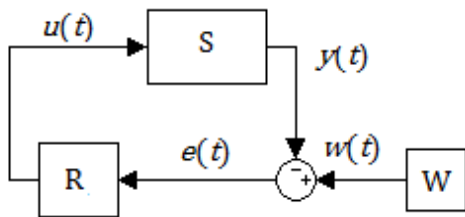
Obr. 1.9 – Schéma jednoduchého uzavřeného regulačního obvodu

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (1.15)$$

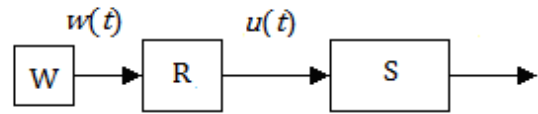
Při regulaci se musí počítat se zatížením poruchovým signálem na výstupu soustavy, který vzniká jako porucha při měření výstupu senzorem. Poruchový signál označen na obr. 1.9 jako blok d, kterým je myšlen náhodný bílý šum s nulovou střední hodnotou. Tuto poruchu lze ze systému odfiltrovat, podrobný přehled filtračních metod v kapitole 1.6.



Soustava nemusí být regulována pouze zapojením do zpětné vazby obr. 1.10, ale i pomocí dopředné vazby neboli přímé vazby na obr. 1.11. Účelem dopředné vazby je řízení systému, u kterého je předem známo jeho chování v závislosti na vstupní hodnotu, např. ventil na domácím topení. Zpětná vazba se používá pro systémy, u kterých není předem známé jejich chování na vstupní hodnotu, případ inverzního kyvadla. Regulátor zapojený do zpětnovazebního regulačního obvodu se používá v mnoha průmyslových odvětvích, je to jeden z nejdůležitějších principů regulace.



Obr. 1.10 – Zpětná vazba



Obr. 1.11 – Přímá vazba

Mezi nejběžnější regulátory pro praktickou regulaci patří dvoupolohové relé, třípolohové relé a univerzální PID regulátor, který je nejvíce rozšířený v průmyslu, cca 90 % všech regulátorů tvoří právě PID regulátor.

Kapitola čerpána z (CVEJN, 2006).

### 1.4.1 PID regulátor

Univerzální automatický PID tedy (proporcionálně-integračně-derivační regulátor) na obr. 1.12 je snadno realizovatelný, například pomocí operačních zesilovačů a obsahuje ve svém nejběžnějším tvaru zesilující P složku, integrační I složku a derivační D složku, tyto tři složky umožňují měnit parametry regulátoru a ovlivňovat tak průběh regulačního pochodu. Pro různé požadavky regulace nejsou všechny tyto složky nutné, záleží na charakteru regulované soustavy a dalších podmínkách regulace.

Vzorec pro výpočet akčního zásahu PID regulátoru:

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_1 \cdot \int_0^t e(t) dt + r_2 \cdot e'(t) \quad (1.16)$$

V praxi se více používá paralelního tvaru:

$$u(t) = r \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(t) dt + T_D \cdot e'(t) \right] \quad (1.17)$$

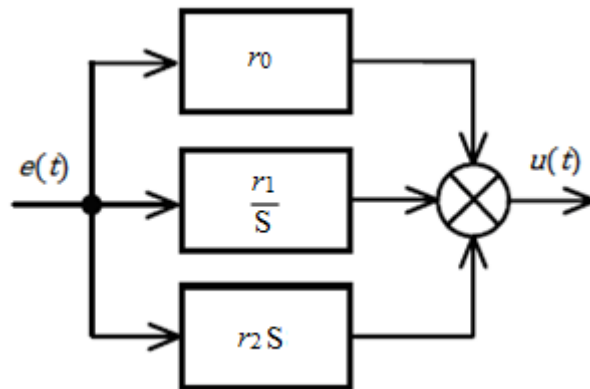
Speciální případy PID regulátoru:

$r_1 = r_2 = 0$  ... P regulátor (pouze zesílení zpětné vazby)

$r_1 = 0$  ... PD regulátor

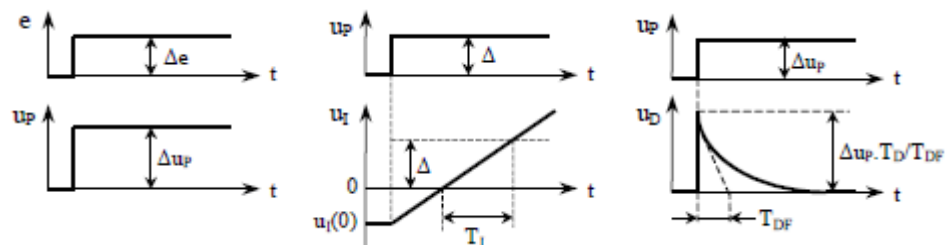
$r_2 = 0$  ... PI regulátor

$r_0 = r_2 = 0$  ... I regulátor (regulátor obsahuje pouze integrační složku)



Obr. 1.12 – Schéma paralelního PID regulátoru

P složka slouží jako proporcionalní zesílení se zesílením  $k$  a zrychluje regulační děj. U soustav bez integračního charakteru samostatná P složka nezaručí nenulovou regulační odchylku, neboť pro nenulovou hodnotu výstupní veličiny je nutný nenulový akční zásah regulátoru, tzn. nenulová regulační odchylka. Integrační složka slouží k odstranění trvalé regulační odchylky i pro stacionární systémy, avšak zvyšuje řád soustavy a zpomaluje regulační děj. D složka urychluje regulační děj, tzn. snižuje řád soustavy a umožňuje zpětné vazbě reagovat s určitým předstihem, což je ideální pro řízení rychlých soustav. Jestliže je výstup soustavy zatížen vysokofrekvenčním šumem derivační složka způsobí nežádoucí zesílení vedoucí k rozkmitání akční veličiny nad meze systému, které může destabilizovat soustavu nebo poškodit regulační systém. Kapitola čerpána z (CVEJN, 2006).



Obr. 1.13 – Přečtové charakteristiky PID regulátoru (NĚMEC, 2002)

Důležitým pro správné fungování PID regulátoru je správné nastavení jeho parametrů, které mohou být získány optimalizační metodou nebo jednoduše metodou pokus-omyl. V následující kapitole je popsána nejběžnější metoda nastavení PID regulátoru.

Pro stabilizaci robota je použita diskretní forma PID regulátoru tedy PSD (proporcionálně-sumačně-diferenční) regulátor.

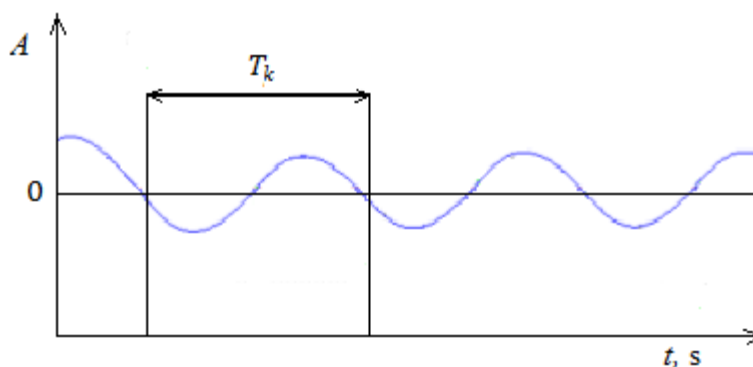
### 1.4.2 Nastavení PID Ziegler-Nicholsovou metodou

Jednoduchá metoda vyžadující znalost přenosu soustavy nebo vyžadující fyzický model. Nejprve položíme integrační a derivační časovou konstantu rovnu nule a poté hledáme proporcionální zesílení takové, že regulovaný uzavřený obvod kmitá s ustálenou amplitudou a periodou na obr. 1.14. Příslušné zesílení označíme jako  $r_{0k}$  tzv. kritické zesílení systému a periodu kritických kmitů  $T_k$ .

Z kritické periody  $T_k$  a kritického zesílení  $r_{0k}$  lze vypočítat pomocí tab. 1.2 nastavení konstant  $r_0$ ,  $r_1$  a  $r_2$  z rovnice (1.16) pro PID regulátor (CVEJN, 2006).

Tab. 1.2 – Nastavení parametrů PID regulátoru

Typ regulátoru	$r_0$	$r_1$	$r_2$
<b>P</b>	$0,5 \cdot r_{0k}$		
<b>PI</b>	$0,45 \cdot r_{0k}$	$0,85 \cdot T_k$	
<b>PID</b>	$0,6 \cdot r_{0k}$	$0,5 \cdot T_k$	$0,125 \cdot T_k$

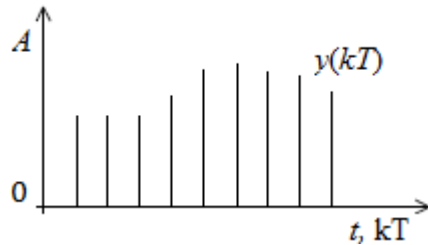


Obr. 1.14 – Identifikace kritické periody

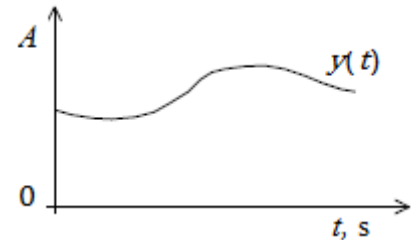
### 1.5 Diskretní regulace

Diskretní řízení se realizuje např. diskretním počítačem či mikrokontrolérem v jednotlivých časových intervalech neboli vzorkovacích periodách, schéma číslicového regulačního obvodu na obr. 1.17. Vzorky časového spojitého signálu  $y(t)$  se získají vzorkováním této spojitě funkce na obr. 1.16 (tj. funkce, jejíž hodnotu lze v každém časovém okamžiku určit) s časovou periodou vzorků  $T$ , tento navzorkovaný signál se nazývá diskretní

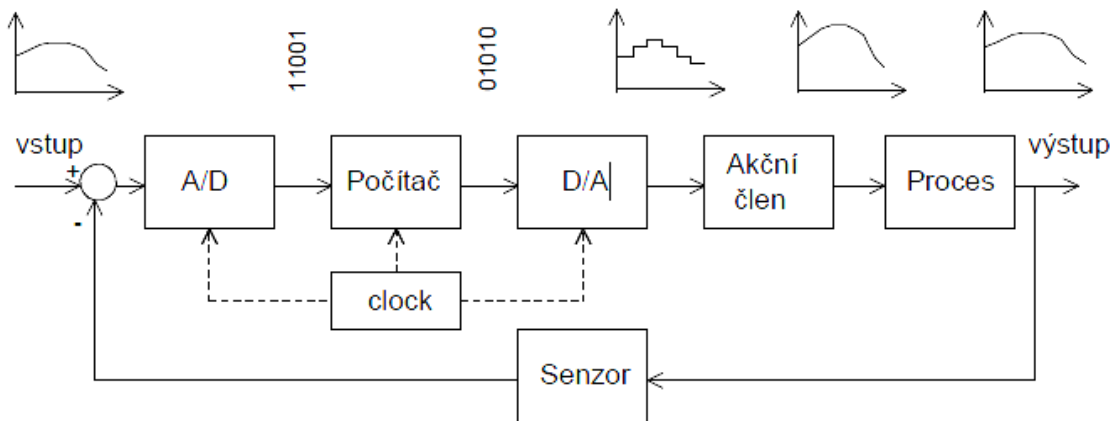
signál  $y(kT)$ , kde  $k$  je násobek periody vzorkování  $T$  na obr. 1.15. Diskrétní regulace se řídí obdobnými principy jako spojitá regulace, jen probíhá v diskrétním čase, kvůli diskrétním prvkům regulačního systému např. mikrokontroléru.



Obr. 1.15 – Diskrétní signál



Obr. 1.16 – Spojitý signál



Obr. 1.17 – Schéma diskrétního řídicího systému (NĚMEC, 2002)

### 1.5.1 PSD regulátor

Pro řízení diskrétního uzavřeného obvodu se používají diskrétní regulátory, které jsou odvozeny od spojitých forem řízení, tedy konkrétně PSD (proporcionálně-sumačně-diferenční) regulátor odvozen z PID regulátoru. Akční zásah PSD regulátoru je realizován v jednotlivých časových intervalech, místo spojitě funkce jako u PID regulátoru má význam jednotlivých číselných hodnot zásahu v časových intervalech.

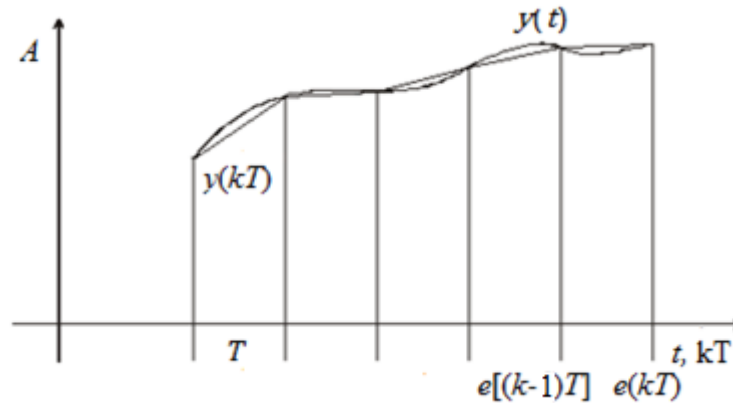
Pro odvození PSD regulátoru vyjdeme z rovnice pro akční zásah PID regulátoru:

$$u(t) = r \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(t) dt + T_D \cdot e'(t) \right] \quad (1.18)$$

Proporcionální člen lze jednoduše realizovat i pomocí diskrétního regulátoru, to ovšem neplatí pro integrál a derivaci. Integrační člen v rovnici (1.18) musí být aproximován numerickou

integrací, konkrétně lichoběžníkovým pravidlem na obr. 1.18, který je nejvíce přesným pro aproximaci integrace v rovnici (1.19):

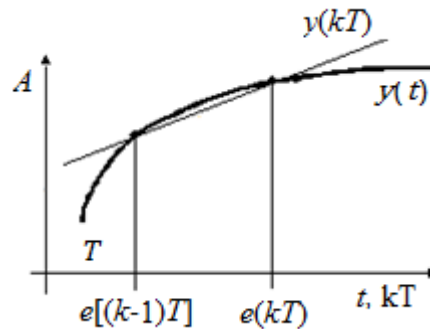
$$\int_0^t e(t) dt = T \cdot \sum_{i=1}^k \frac{e(iT) + e[(i-1)T]}{2} \quad (1.19)$$



Obr. 1.18 – Aproximace lichoběžníkovým pravidlem

Derivační člen lze aproximovat diferencí na obr. 1.19 popsán rovnicí (1.20):

$$e'(t) = \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (20)$$



Obr. 1.19 – Diference

Při dosazení rovnice (1.19) a (1.20) do původní rovnice (1.18) pro PID regulátor dostaneme rovnici (1.21) pro akční zásah diskrétního PSD regulátoru:

$$u(kT) = k_r \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{e(iT) + e[(i-1)T]}{2} + \frac{T_D}{T} \cdot \{e(kT) - e[(k-1)T]\} \right\} \quad (21)$$

Kapitola čerpána z (BALÁTĚ, 2003).

## 1.6 Filtrování dat

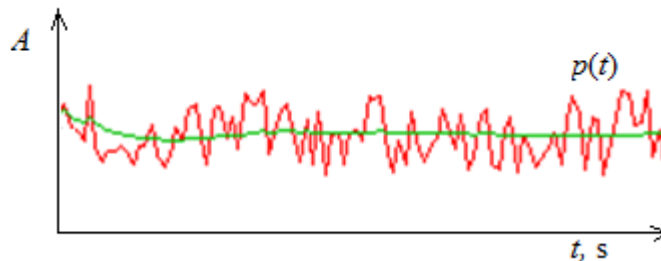
Filtrování slouží pro odstranění bílého náhodného šumu působícího na výstupu soustavy tedy vzniklý chybou měření. Pro přesnou regulaci náklonu a stavu systému je nutné získat přesná data ze senzorů s odfiltrovaným šumem popř. náhodnou chybou.

### 1.6.1 Aritmetický průměr dat

Jednoduché průměrování slouží pro filtrování konstantní hodnoty od chybného měření, s rostoucím počtem měření se zvyšuje přesnost odhadu měřené hodnoty tzn. zmenšuje se rozptyl Gaussova rozložení chyby a měřená hodnota se přibližuje pravdivé hodnotě. Pro výpočet průměru se využívá všech měření. Do výpočtu aritmetického průměru z rovnice (1.22) pro  $n$ -tou hodnotu se využije všech předešlých hodnot měření, k nimž je přičten nově naměřená hodnota  $p(n)$ , aby se zachoval poměr mezi počtem prvků v průměru je vynásoben vahou  $1/n$  (WINKLER, 2005).

Vzorec pro výpočet aritmetického průměru dat:

$$p(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (1.22)$$



Obr. 1.20 – Aritmetický průměr

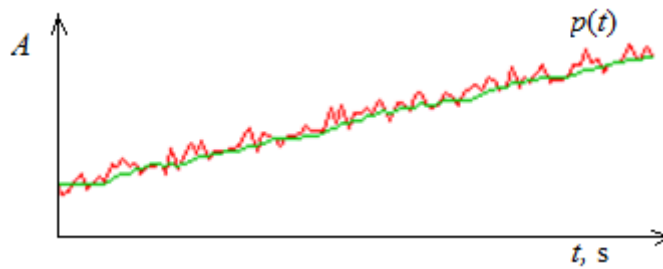
### 1.6.2 Klouzavý průměr

Klouzavý průměr je průměr z několika posledních hodnot, hodnotu průměru lze počítat i rekurzivně a složitost výpočtu tedy nemusí záviset na délce  $k$  průměrovacího okna. V rovnici (1.23) reprezentuje člen  $p \cdot k$  součet posledních  $k$  měření. V dalším kroku od tohoto součtu odečteme nejstarší měření  $x(n-k)$  a naopak přičteme nové měření  $x(n)$ , čímž získáme součet posledních  $k$  měření. Vydělením hodnotou  $k$  vznikne nový plovoucí průměr zaznamenávající posledních  $k$  měření. Tedy celá hodnota průměru pluje po rostoucím počtu měření a není závislá na datech z předešlých měřeních naopak od aritmetického průměru.

Tento průměr lze velice dobře použít pro měnící se signály na odfiltrování šumu (WINKLER, 2005).

Vzorec pro výpočet plovoucího průměru dat:

$$p(t) = \frac{\{p \cdot k - (y(n-k) + y(n))\}}{k} \quad (1.23)$$

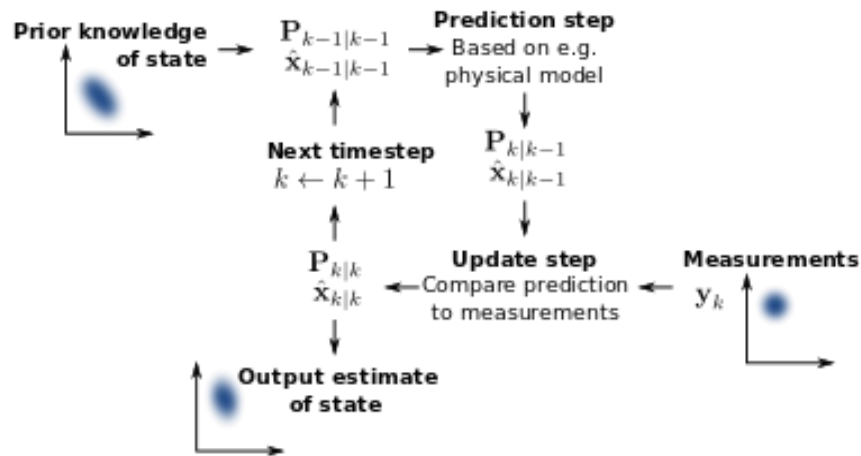


Obr. 1.21 – Klouzavý průměr

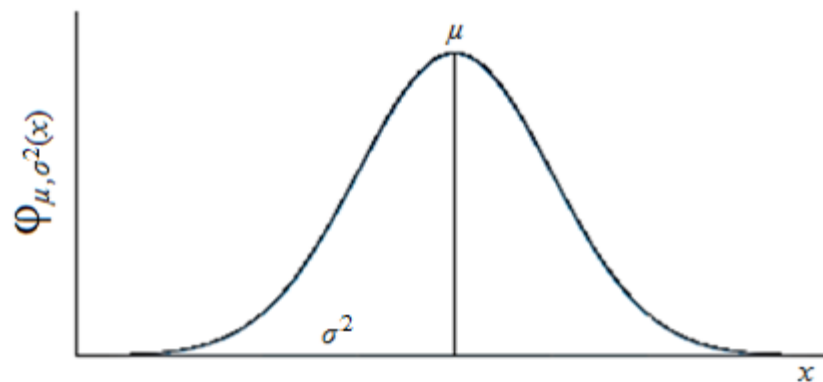
### 1.6.3 Kálmánův filtr

Kálmánův filtr je důležitý matematický aparát pro přesný odhad polohy a stavu měřeného objektu ze zašuměných dat. Filtr byl vytvořen Rudolfem E. Kálmánem pro americkou vesmírnou společnost NASA, filtr je používán pro nespočet technologických aplikací např. predikci polohy orbitálních družic a robotů (KALMAN FILTER, 2001).

Filtrace probíhá v časové oblasti, tudíž odpadá jakákoliv transformace do frekvenční oblasti pomocí FFT, to je pro odhad zašuměného měření polohy robota velice přínosné. Výhodou tohoto systému je schopnost získat čistý signál a hodnoty ze zašuměného signálu nebo jinak znehodnoceného souboru výstupních hodnot systému, i bez jakéhokoliv poznatku o rušení a šumu. Prakticky lze zjistit skutečné hodnoty polohy systému, které jsou přímým měřením těžko zjistitelné, protože se při samotném aktu měření do získaných hodnot indukují chyby měřících přístrojů nebo okolní působící šum a rušení. V podstatě Kálmánův filtr je predikční- korekční algoritmus, který z předchozích a i následných budoucích dat snaží předpovědět průběh signálu na základě Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti chyb, které je přímo úměrné skutečnému odhadu polohy, tedy vždy z průběhu minulých vzorků signálu a vzorků následujících, např. neznámí čistý signál bez rušení jen z měřeného. Ty jsou pak konfrontovány s opravdu naměřenými vzorky na obr. 1.22 a jejich rozdíl se opět využívá k zlepšení odhadu dalších budoucích hodnot polohy.



Obr. 1.22 – Koncept Kálmánovi filtrace (KALMAN FILTER, 2001)



Obr. 1.23 – Gaussovo rozdělení

Kálmánův filtr reprezentuje hustotu odhadu polohy prostřednictvím normálního neboli Gaussova rozdělení chyby na obr. 1.23. Toto rozdělení je charakterizováno pouze dvěma parametry: střední hodnotou  $\mu$ , která popisuje, kde má zvonovitá Gaussova křivka svůj vrchol, a rozptylem  $\sigma^2$ , který vyjadřuje, šířku Gaussovy křivky. Normální rozdělení je unimodální, Gaussova křivka má tedy vždy jeden jediný vrchol a tak není schopná vyjádřit více hypotéz o různých polohách robota současně, vždy jen jedna skutečná poloha. Přesná reprezentace odhadu polohy pouhými dvěma hodnotami, střední hodnotou a rozptylem, je prostorově a také výpočetně mnohem méně náročná (VOJÁČEK, 2007c).

Celý algoritmus Kálmánova filtru se skládá ze dvou kroků:

- **Predikční krok**
- **Korekční krok**

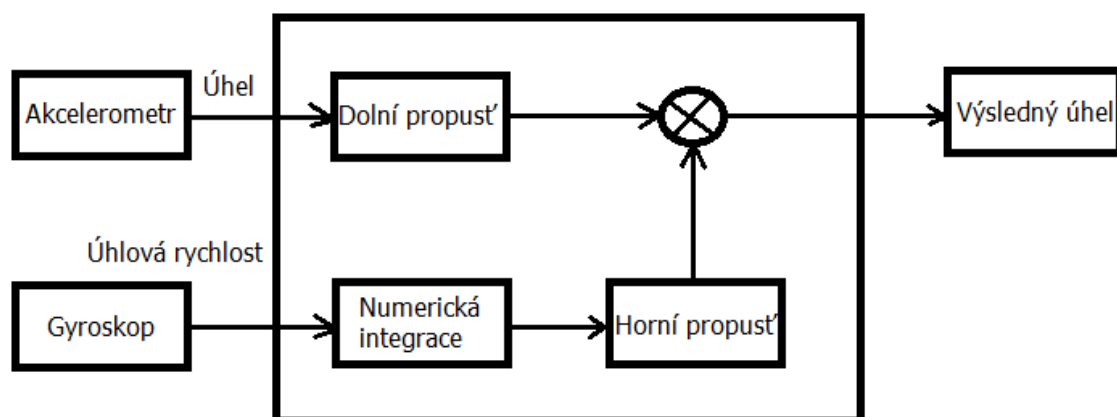


V predikčním kroku se podle relativního měření upraví odhad polohy, rozptyl odhadu polohy se přitom vždy zvětšuje, a to právě o míru nejistoty zanesenou do odhadu zahrnutím posledního omezeně přesného relativního měření.

V korekčním kroku se aposteriorní odhad polohy vypočítává v zásadě jako vážený průměr apriorního odhadu polohy a polohy odhadnuté absolutním měřením. Parametr, který určuje váhu apriorního odhadu polohy a odhadu z absolutního měření ve váženém průměru, se nazývá Kálmánův zisk nebo Kálmánovo zesílení, a je závislé na rozptylech obou odhadů. Do aposteriorního odhadu je tak zahrnut větší měrou ten z odhadů, jehož rozptyl je menší. V korekčním kroku se rozptyl odhadu polohy snižuje. Po provedení korekčního kroku je vždy menší nebo roven rozptylům obou odhadů, které se v korekčním kroku kombinují (WINKLER, 2005).

#### 1.6.4 Komplementární filtr

Komplementární filtr je důležitý filtr pro filtraci dat z akcelerometru a gyroskopu, je použit pro sloučení dat dohromady, ideové schéma na obr. 1.24. Data z akcelerometru jsou zašuměna dynamickým zrychlením působícím na soustavu při jejím pohybu a data z gyroskopu jsou vzhledem k dynamice pohybu soustavy přesná, avšak mají nevýhodu gyroskopického driftu nejvíce působícího ve stacionární oblasti, který vzniká při numerické integraci úhlové rychlosti na úhel náklonu.



Obr. 1.24 – Komplementární filtr

Tato integrace je realizována numerickým pravidlem pro aproximaci integrace, tedy mezi skutečnou integrací (obsahem pod křivkou) a aproximovanou integrací a jejím obsahem pod křivkou vzniká aproximační chyba (drift). Sloučením dat z akcelerometru a gyroskopu lze

dostat přesnější data z obou senzorů, tedy při pohybu robota přesná a při stabilním stavu očištěná o driftovací chybu (VAN DE MAELE, 2013).

Vzorec pro komplementárního filtru:

$$Výsl_{úhel} = A \cdot (Výsl_{úhel} + gyrData \cdot T) + (1 - A) \cdot akcData \quad (1.24)$$

Kde  $A$  je váha gyroskopu a  $(1-A)$  váha akcelerometru.

## 1.7 Akcelerometr

Akcelerometry obr. 1.25 jsou senzory používající se pro měření zrychlení, měření vibrací při pohybu struktur, měření natočení, měření odstředivé síly, detekce pádu a také v automobilovém průmyslu pro měřící čidla Airbagů. Podle působení zrychlení na akcelerometr ho můžeme rozdělit na dynamické zrychlení a statické zrychlení.



Obr. 1.25 – Akcelerometr

Dynamické zrychlení resp. síla vzniklá změnou rychlosti pohybujícího se tělesa (senzoru). Statické zrychlení resp. síla vzniklá při působení gravitace země, je to zrychlení, které působí na objekt neustále a v případě dynamického měření jej musíme odfiltrovat, aby byla získána přesná informace o zrychlení očištěná od statického nebo dynamického zrychlení.

Princip výpočtu úhlu natočení pro balančního robota popsán v kapitole 1.3.1.

### 1.7.1 Typy akcelerometrů

Mezi nejpoužívanější typy akcelerometrů patří piezoelektrický, piezorezistivní akcelerometr a akcelerometr s proměnou kapacitou.

- **Piezoelektrické akcelerometry**

Tento snímač se skládá ze dvou částí z piezoelektrického materiálu (piezoelektrický krystal), který funguje jako měřicí snímač zrychlení a seismická hmota, která převádí dle Newtonova zákona hodnotu zrychlení na sílu:

$$F = m \cdot a \quad (1.25)$$

Kde  $a$  je zrychlení a  $m$  je hmotnost seismické hmoty. Piezoelektrický materiál je uložen pod seismickou hmotou, proto při působení zrychlení na seismickou hmotu se na piezoelektrický materiál přenáší síla přímo úměrná velikosti zrychlení a hmotnosti seismického tělesa. Díky této síle se na piezoelektrickém materiálu generuje elektrický náboj  $Q$ . Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je přímo úměrný zrychlení senzoru (VOJÁČEK, 2007a).

- **Piezorezistivní akcelerometry**

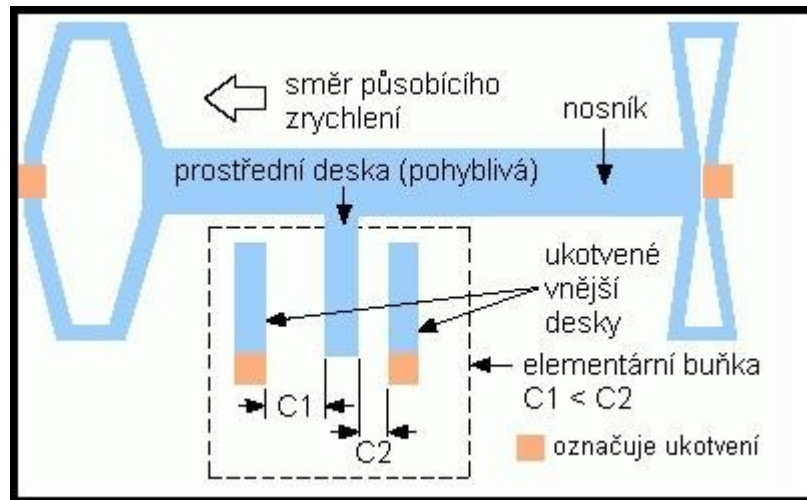
Tento senzor je založen na stejném principu jako piezoelektrický akcelerometr. Piezorezistivní akcelerometr využívá piezorezistivní materiál na rozdíl od piezoelektrického snímače zrychlení. Tento materiál při působícím tlaku seismickou hmotou mění svůj odpor, proto je změna zrychlení rovna změně odporu. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá sítě vyleptaných měřících piezorezistivních snímačů (můstků) zapojených ve Wheastonově můstku. Piezorezistivní akcelerometry mají tu výhodu proti piezoelektrickým, že mohou měřit i stálou (neměnnou) akceleraci, tj. frekvenci změn od 0 Hz (VOJÁČEK, 2007b).

- **Akcelerometry s proměnou kapacitou**

Princip činnosti těchto senzorů je založen na změně kapacity vnitřního integrovaného kondenzátoru působením síly, která byla udělena akcelerací senzoru. Samostatné čidlo je vlastně mikro-mechanická-polykřemíková struktura plovoucí na povrchu křemíkového monokrystalu na obr. 1.26. Pod monokrystalickou deskou jsou umístěny dva kondenzátory v diferenčním zapojení. Proto dojde-li k posunutí či deformaci pohyblivé struktury působením zrychlení, je tato změna zaznamenána jako změna poměru kapacity. Struktura senzoru umožňuje měřit kladná a záporná i statická a dynamická zrychlení (ROZSÍVAL, 2011).

Změna poměru kapacity je vyjádřena jako změna jednotlivých kapacit, která je přímo úměrná permitivitě  $\varepsilon$  a nepřímo úměrná podílu obsahu ploch elektrod  $S$  a vzdálenosti elektrod  $d$  dle vztahu:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (1.26)$$



Obr. 1.26 – Princip akcelerometru s proměnou kapacitou (ŠTEFL, 2012.)

## 1.8 Gyroskop

Gyroskopy jsou snímače používající se k stanovení úhlové rychlosti a natočení. V praxi se používají zejména v navigaci např. u letadel a balistických raket. Přístroj obsahuje setrvačnick, který zachovává polohu osy své rotace v inerciálním prostoru. Přesnost gyroskopu závisí na stabilitě udržení jeho otáček.

Gyroskopy lze rozdělit podle fyzikálního principu na tyto kategorie:

- **Mechanické**
- **Optické**
- **Jaderné**
- **Elektrické**
- **Kvantové**

### 1.8.1 Mechanický gyroskop

Gyroskop na obr. 1.27 se skládá z otáčejícího setrvačnicku a kovové konstrukce gyroskopu v podobě dvou kruhů na sebe kolmých. Osou setrvačnicku vede kovová osa, která jej spojuje s kovovou konstrukcí. Otáčející se setrvačnick má moment hybnosti, takže jeho osa bez působení vnějších sil udržuje stále stejný směr, je to tedy zařízení, které dokáže určit svoji orientaci v prostoru (setrvačnick nemění při rotaci svou polohu a tím dává informaci o orientaci dopravního prostředku v prostoru). Obvykle je setrvačnick uložen v tzv.

Cardanových závěsech, má 3 stupně volnosti. Pro tuto vlastnost je hojně využíván např. v letectví (tzv. umělý horizont), dále jako gyromouse, spaceball, či na lodích atd. Pokud se v gravitačním poli zavěsí gyroskop na lanko a roztočí, osa otáčení se změní do pravého úhlu k závěsu a gyroskop se otáčí podél osy shodné se směrem působení gravitační síly (každé rotující těleso má snahu dostat se do polohy s největším momentem setrvačnosti, což je v případě rotujícího válce, resp. tenké kruhové desky rotace kolem osy kolmé k ose válce). Tento typ pohybu se nazývá precese. Čím větší je setrvačnick a čím rychleji jej roztočíme, tím je precese výraznější. Pevnost osy gyroskopu v prostoru je dána prvním Newtonovým zákonem, který říká, že těleso které je v klidu nebo v pohybu zůstává v setrvačném stavu, dokud na něj nezačne působit síla zvnějšku. Takto i osa gyroskopu, která je ze začátku rychle roztočena, má svou vlastní tendenci ve své rotaci a poloze setrvat (GYROSKOP, 2008).



Obr. 1.27 – Mechanický gyroskop (GYROSKOP, 2008)

### 1.8.2 Optický gyroskop

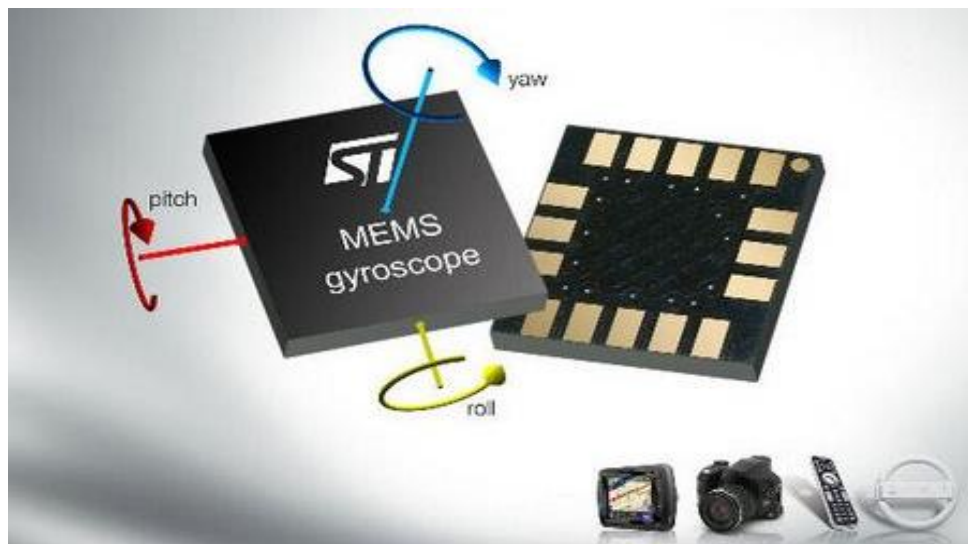
Optické nebo také laserové gyroskopy jsou velice přesné senzory, které umí změřit změnu úhlové rychlosti a následně určit změnu rychlosti. Optické gyroskopy jsou založeny na principu Sagnacova interferometru, kdy jsou proti sobě vystřeleny dva laserové paprsky. Vlivem rotace dochází k vzájemné změně optické dráhy, kterou projdou oba svazky za stejnou dobu. Vyhodnocením j získána úhlová rychlost otáčení. Obvykle se konstruují jako tři gyroskopy s navzájem kolmými osami, aby bylo možné určovat vektor úhlové rychlosti a pozici v prostoru (NOVÁK, 2009).

### 1.8.3 Jaderný gyroskop

U jaderných gyroskopů se využívá jaderného paramagnetismu látek, každý atom nebo molekula má určitý spin (moment hybnosti jader). Spin nabývá celých nebo polo celých násobků redukované Planckovy konstanty  $h = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Js. Vystavíme-li jádra vnějšímu magnetickému poli, jádra se přeorientují podle směru magnetického pole. Když poté vliv pole zrušíme, jádra atomů nám zachovávají stejnou orientaci. Podle orientace jader atomů můžeme získat pozici v prostoru.

### 1.8.4 Elektrický gyroskop

Gyroskopy vyráběné pomocí technologie MEMS. Dnes již můžeme používat gyroskop v podobě integrované logiky, obvodů a samotného snímače.



Obr. 1.28 – Elektrický gyroskop (ELEKTRICKÝ GYROSKOP, 2012)

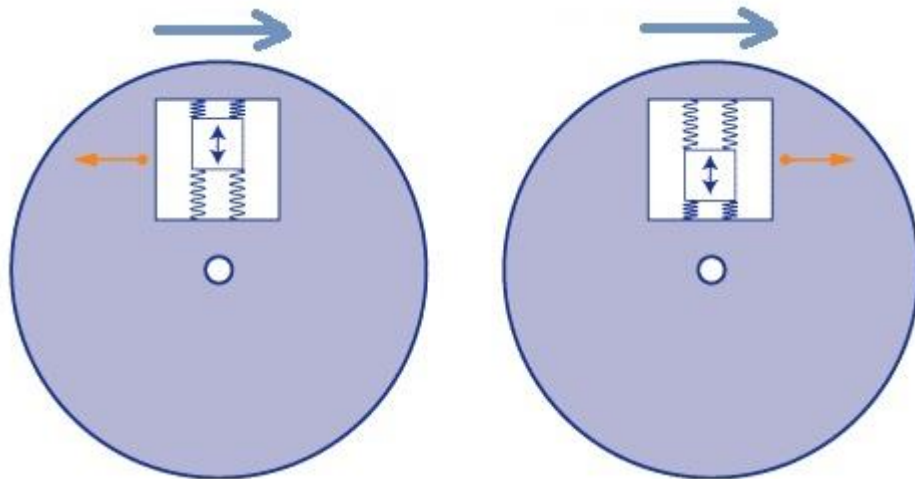
Výstupem MEMS gyroskopu je pak digitální nebo analogový signál. Princip senzoru je založen na Coriolisově síle, to je virtuální síla, která působí na libovolný hmotný předmět či objekt o hmotnosti  $m$ , který se pohybuje rychlostí  $v$  v soustavě rotující kolem své osy úhlovou rychlostí  $\omega$ . Coriolisova síla působí na každý objekt na zemi.

Vzorec pro výpočet Coriolisovy síly:

$$F_c = m \cdot v \cdot \omega \quad (1.27)$$

V praktickém použití Coriolisovy síly v integrovaných gyroskopech se používá technologie MEMS, kde se při výrobě vytváří na samotném senzoru mechanické mikročástice a elektrické obvody. Základem každého senzoru je periodicky se pohybující struktura o

přesně definované hmotnosti, která je upevněna pomocí pružin do rámu. Při samotné rotaci systému dochází k působení Coriolisovy síly na pohybující strukturu, která má za důsledek stlačování pružin na obr. 1.29. Stlačení vnějších pružin způsobí vzájemný posuv měřících plošek fungujících jako elektrody vzduchových kondenzátorů. Výstup je tedy změna kapacity odpovídající změně úhlové rychlosti. Typické použití MEMS gyroskopů je ve spotřební elektronice např. v chytrých mobilních telefonech (VOJÁČEK, 2009)



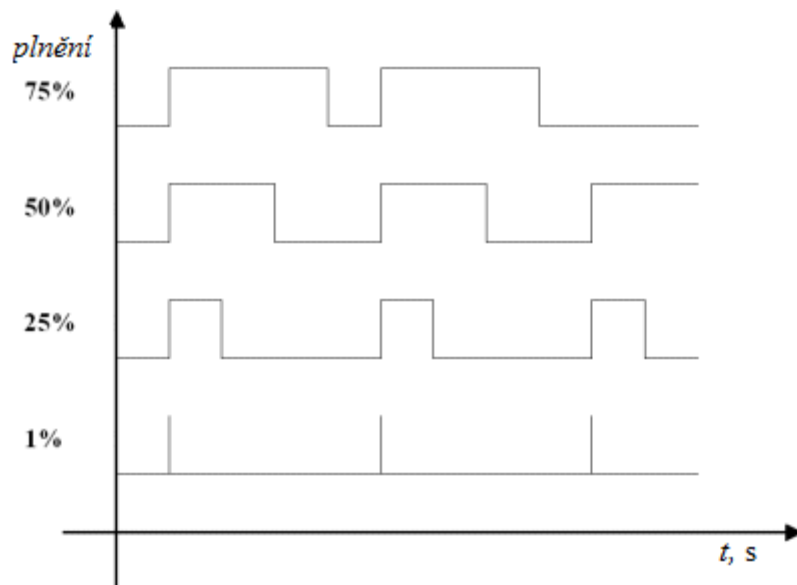
Obr. 1.29 – Princip Coriolisovy síly (VOJÁČEK, 2006)

### 1.8.5 Kvantový gyroskop

Kvantový gyroskop patří mezi zvláštní typy gyroskopů, jež nevyužívají setrvačnosti hmoty, ale vlastností atomových jader.

## 1.9 PWM modulace

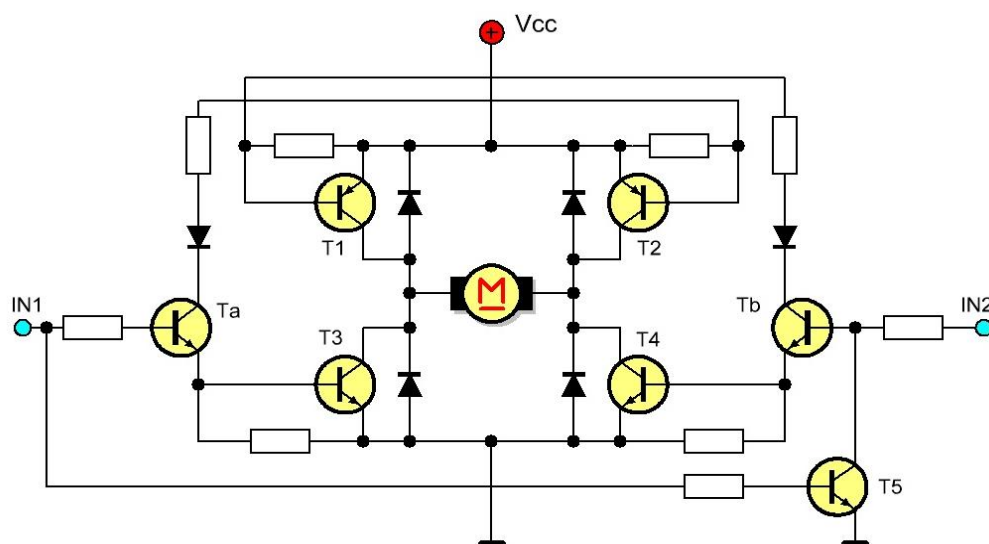
Pulzně šířková modulace je diskretní modulační technika pro přenos analogové informace dvouhodnotovým logickým signálem log. 1/ log. 0, nejvíce se používá pro řízení stejnosměrných motorů a DC měničů. Signál modulace v průběhu přenášení informace nabývá dvou stavů vypnuto log. 0 nebo zapnuto log. 1, poměrem mezi těmito stavy dosáhneme střídy. Velikost střídy pak určuje procentuální hodnotu výkonu mezi zapnutím a vypnutím za jednu periodu signálu, např. pro hodnotu střídy 25:75 dosáhneme 25 procentního výkonu řízeného zařízení. Změnou plnění střídy na obr. 1.30 je dosažen jakýkoliv potřebný výkon zařízení od 0 – 100 % (PULZNĚ ŠÍŘKOVÁ MODULACE, 2001).



Obr. 1.30 – Průběhy PWM modulace pro různou střídu

### 1.10 H můstek

H můstek na obr. 1.31 je elektrický obvod složený z tranzistorů a dalších elektronických součástek, při připojení elektrického proudu na vstupy IN1 a IN2 se řídí průchod elektrického proudu a tedy i směr průchozího proudu motorem právě pomocí vnitřních tranzistorů. H můstkem lze efektivně regulovat směr otáčení stejnosměrných motorů.



Obr. 1.31 – Schéma H můstku

Přivedením logické 0/1 na vstupy IN2 a IN1 je řízen směr otáčení motoru, popsáno v tab. 1.3 (ROBOTEM SEM, ROBOTEM TAM II, 2011).

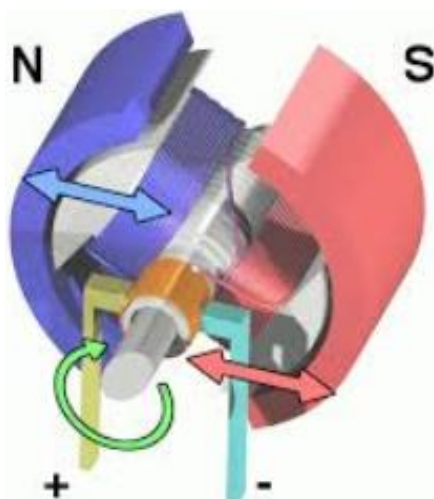


Tab. 1.3 – Řízení motoru

IN 1	IN 2	Směr otáčení
0	0	Motor vypnutý
1	1	Motor stop
0	1	Vlevo
1	0	Vpravo

### 1.11 Stejnosměrný motor

Stejnosměrný motor je akční člen, který převádí elektrickou energii na otáčivý pohyb rotoru. Jako elektrický člen napájen stejnosměrným proudem je ideálně použitelný jako akční člen pro malé robotické systémy. Stejnosměrný motor na obr. 1.32 se skládá ze statoru a rotoru, stator je pasivní prvek, jenž je osazen magnetem. Rotor je aktivní prvek s vnitřním vinutím, které je upevněno na hřídeli. Průchodem elektrického stejnosměrného proudu vzniká na cívkách vinutí magnetické pole. Jelikož se souhlasné póly magnetu odpuzují, vzniká tak odpuzující síla jak je zobrazeno na obr. 1.32, která způsobí otočení rotoru motoru, k dalšímu otočení je potřeba elektrických prvků např. komutátoru, který změní směr protékajícího proudu a dojde k dalšímu otáčení. Tento cyklus se stále opakuje a dochází ke stálému otáčení rotoru (STEJNOSMĚRNÝ MOTOR, 2013).



Obr. 1.32 – Princip funkce stejnosměrného motoru

Stejnosměrný motor obvykle pracuje s vysokými otáčkami a nízkým krouticím momentem, což je pro mobilní roboty nevýhodné. Tato nevýhoda se minimalizuje převodovkou umístěnou na motoru, tím se sníží rychlost motoru a zvýší krouticí moment. Obvykle má motor dvě svorky pro připojení vstupního proudu, po jeho připojení se rotor

motoru roztočí, a jeho otáčky se ustálí na jmenovitých otáčkách. Změnou polaritu průchozího proudu se změní směr otáčení, změnou velikosti napětí pak změnu rychlosti otáčení. Pro výběr motoru je důležité dbát na jeho parametry a typ motoru, zejména pak na jmenovité otáčky bez zátěže, jmenovité otáčky se zátěží na rotoru, jmenovitý krouticí moment, typ motoru např. 12 V stejnosměrný motor a převodový poměr převodovky (NOVÁK, 2005).

Stejnosemřný motor lze popsat soustavou diferenciálních rovnic, rovnicí pro napětí stejnosměrného motoru (1.30) a rovnicí pro moment motoru (1.31) vycházejících z (1.28) a (1.29). Otáčí-li se rotor rychlostí otáčení  $\omega$  a prochází magnetickým tokem  $\phi$  s konstantou motoru  $C$  indukuje napětí  $U_i$ . Náhradní schéma motoru pro odvození na obr. 1.33.

$$U_i = C\phi\omega \quad (1.28)$$

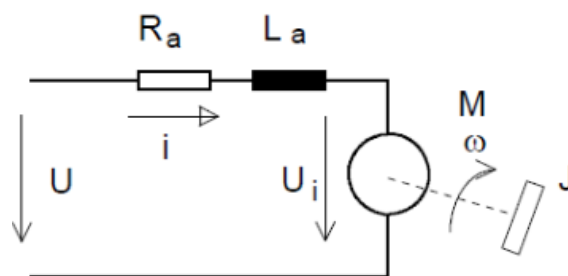
Prochází-li vinutím proud  $I$  při magnetickém toku  $\phi$  s konstantou motoru  $C$  vzniká na rotoru moment  $M_H$ .

$$M_H = C\phi I \quad (1.29)$$

$$u(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + U_i \quad (1.30)$$

$$M_H = J\frac{d\omega}{dt} + M_Z \quad (1.31)$$

Kde  $R$  je odpor motoru,  $L$  indukčnost cívky,  $J$  moment setrvačnosti a  $M_Z$  je zatěžovací moment motoru (NOVÁK, 2005).



Obr. 1.33 – Náhradní elektrické schéma motoru (NOVÁK, 2005).

## Výhody

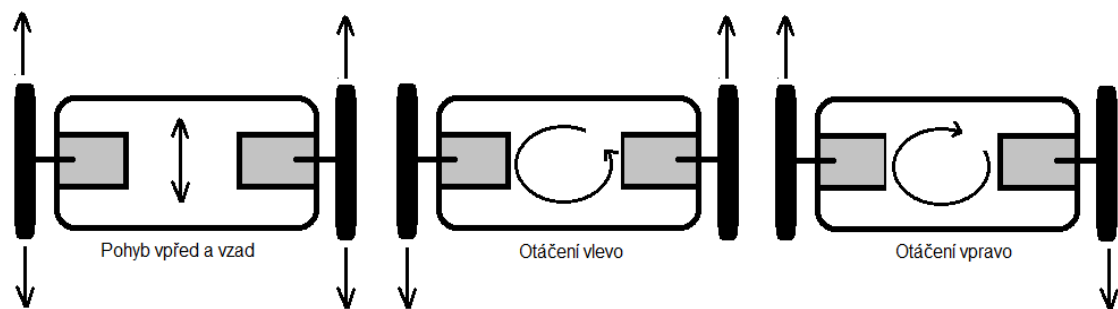
- snadné řízení - změnou budícího napětí na rotoru
- lineární charakteristika závislosti otáček na budícím napětí na rotoru

## Nevýhody

- komutátor - nutná údržba kluzných kontaktů (uhlíkových kartáčů). Vzniká zde také jiskření, které v kombinaci s průmyslovým prachem může zapříčinit výbuch (STEJNOSMĚRNÝ MOTOR, 2013).

### 1.11.1 Řízení diferenciálního podvozku se stejnosměrnými motory

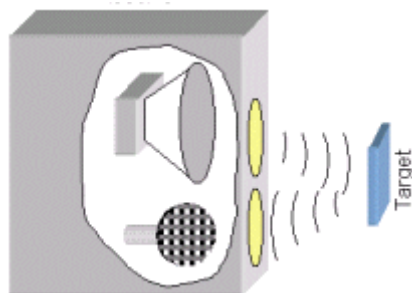
Pro stabilizaci robota budou využity dva stejnosměrné motory. Diferenciálním řízením motorů lze dosáhnout samostatného otáčení jednoho motoru nezávisle na druhém, robot se díky tomu dokáže otáčet na místě nebo zatáčet, jak je vidět na obr. 1.34. Pohyb vpřed a vzad a vzad je využit pro balancování robota a pohyb do stran zajišťuje vyhýbání se překážkám při jízdě robota.



Obr. 1.34 – Diferenciální řízení podvozku

## 1.12 Ultrazvukový senzor

Ultrazvuk je akustické vlnění, jehož frekvence leží nad slyšitelností lidského ucha, tedy nad horní hranicí slyšitelnosti cca 20 kHz. Pro ultrazvuk platí stejné fyzikální zákony pro šíření v prostoru jako pro zvukové vlny slyšitelného pásma. Rychlost zvuku ve vzduchu je 331,5 m/s.



Obr. 1.35 – Princip ultrazvukového senzoru

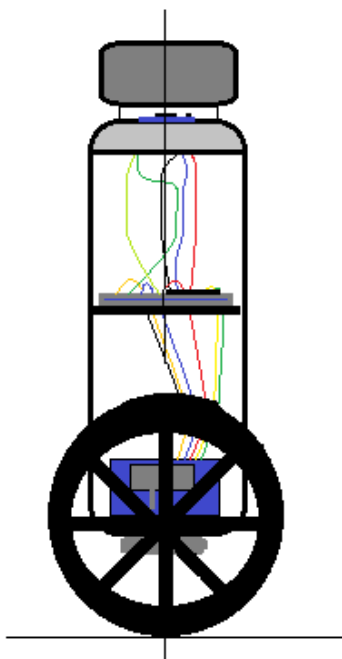
Jako měnič zvuku pro ultrazvukový senzor se využívají nejčastěji piezokeramické měniče, doplníme-li měnič o další funkční prvky, vznikne zařízení, díky kterému je možno měřit vzdálenost objektu. Senzor pracuje na principu vyhodnocování času odezvy vyslaného impulzu z vysílače, ten vyšle několik impulzů šířících se rychlostí zvuku v daném prostředí. Je-li před senzorem objekt, tak se od něj některé zvukové vlny odrazí a putují zpět k vysílači, kde jsou zachyceny přijímačem. Elektronický obvod a vyšší řídicí jednotka poté čas odezvy vyhodnotí a pomocí znalosti rychlosti zvuku jej převedou na vzdálenost k zachycenému objektu (SENZORY PRO PRŮMYSL, 2012).

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části je popsán návrh a samotná realizace balančního robota.

### 2.1 Realizace robota

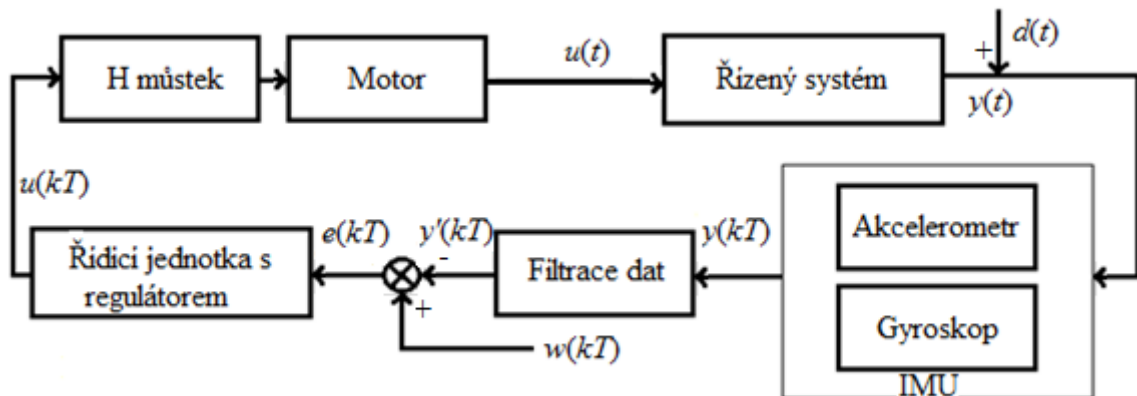
Samotné tělo robota je tříúrovňové, ideová představa robota na obr. 2.1, konstrukčně je řešen z lehkého materiálu. Tři obdélníkové desky z modelářské dýhy jsou spojeny lehkými duralovými trubičkami o délce 20 cm, ty jsou připevněny lepidlem k podložkám, na nichž je osazen elektronický systém balančního robota. Na vrcholu těla robota je umístěn akcelerometr a baterie pro napájení stejnosměrných motorů, především kvůli zajištění stability a principu inverzního kyvadla, které má svou hmotu uloženu na konci ramene kyvadla. Uprostřed těla je umístěna řídicí deska Arduino Uno spolu s elektronickým gyroskopem a ultrazvukovým senzorem pro vyhledávání překážek před robotem. Spodní deska je osazena dvěma stejnosměrnými motory a H můstkem pro regulaci pohonu.



Obr. 2.1 – Schéma balančního robota

Řídicí systém pro stabilizaci robota na obr. 2.2 je tvořen regulačním, akčním a sensorickým systémem, tzv. IMU jednotka složená z akcelerometru, gyroskopu a ultrazvukového senzoru. Vstup i výstup ze systému probíhá ve spojitě oblasti, výstup systému je snímán IMU jednotkou v jednotlivých vzorkovacích periodách  $T = 4$  ms, dle časové doby průběhu smyčky programu. IMU měří stav řízeného systému a posílá data do řídicí jednotky, tyto data jsou zašuměná, proto je nutné před přivedením do regulátoru data

filtrovat, filtrace signálů je řešena v následující kapitole. PSD regulátor je realizován softwarově v řídicí jednotce, na jejíž vstup je přivedena regulační odchylka systému a ta je přepočítána dle vzorce (1.21) na ideální akční zásah pro stabilizaci systému. Akční zásah ve tvaru diskrétního signálu je převeden tvarovacím prvkem v řídicí jednotce na schodovitý spojitý signál, kterým se ovládá směr a rychlost otáčení motorů akčního systému na základě naprogramovaného algoritmu v kapitole 2.5.



Obr. 2.2 – Blokové schéma řídicího systému

Regulační systém je realizován vývojovým kitem Arduino Uno s mikrokontrolérem ATmega 328, v němž cyklicky probíhá stabilizační a řídicí program.

## 2.2 Použité prvky pro stabilizaci

### 2.2.1 Řídicí jednotka

Arduino Uno na obr. 2.3, vyrobené italskou společností Arduino company, bude použito jako řídicí jednotka, která bude zpracovávat data ze senzorů pomocí mikrokontroléru ATmega 328. Řídicí jednotka bude napájena externí 9 V baterií. K tomuto mikrokontroléru bude připojen akcelerometr, ultrazvukový senzor a gyroskop pomocí analogových a digitálních vstupně výstupních pinů, které jsou již na desce Arduino integrovány. Tato deska je vybrána především díky jednoduchosti zapojení komponent a také díky velice dobře zpracovaným materiálům a nápovědám k tomuto produktu. Platforma Arduino Uno je programována upravenou verzí programovacího jazyka C, ke kterému nabízí mnoho knihoven pro usnadnění přístupu k připojeným zařízením. Deska se skládá z mikrokontroléru Atmel ATmega 328, 14 digitálních vstupně/výstupních pinů, 6 analogových pinů a USB konektoru pro naprogramování mikrokontroléru a napájení desky. Kompletní schéma zapojení desky Arduino Uno je uvedeno v příloze B.



Obr. 2.3 – Arduino Uno

### Parametry

- Mikrokontrolér ATmega 328
- Mikrokontrolér ATmega 16U2 sloužící jako převodník USB
- Operační napětí: 5 V
- Výstupní napětí 3,3 V nebo 5 V
- Doporučené vstupní napětí: 7-12 V
- Maximální vstupní napětí: 20 V (nedoporučuje se)
- Počet digitálních V/V pinů: 14
- Počet Analogových pinů: 6
- Flash paměť: 32 kB
- SRAM: 2 kB
- EEPROM: 2 kB
- Frekvence: 16 MHz
- Napájení pomocí USB konektoru nebo 2,5 mm jack
- Nízká cena
- Kompatibilní s mnoha senzory
- Snadné programování

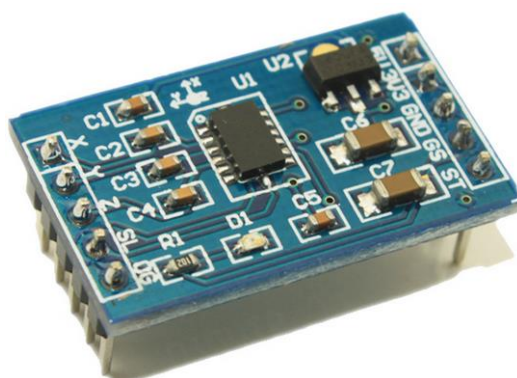
Tab. 2.1 – Popis funkce pinů desky Arduino Uno

Číslo pinu	Jméno pinu	Funkce pinu
	RESET	Resetování mikrokontroléru
	3,3 V	Generuje napětí 3,3 voltů
	5 V	Generuje napětí 5 voltů
	GND	Uzemnění
	GND	Uzemnění
	Vin	Vstupní napětí pro Arduino
0 - 5	A0 - 5	Analogový vstup
0	RX	Digitální pin používaný pro přijímání dat po sériové lince
1	TX	Digitální pin používaný pro odesílání dat po sériové lince
2 - 13	D2 - 13	Dig. V/V piny 3, 5, 6, 9, 10 a 11 umožňují PWM signál
	GND	Uzemnění
	AREF	Referenční napětí

Kapitola čerpána z (ARDUINO, 2012).

### 2.2.2 Akcelerometr MMA 7361

Pro výpočet aktuálního úhlového vychýlení balančního robota byl zvolen tříosý akcelerometr MMA 7361 na obr. 2.4, pro určení vychýlení jsou potřebné pouze 2 osy, osa x a y, princip výpočtu uveden v kapitole 1.3.1.



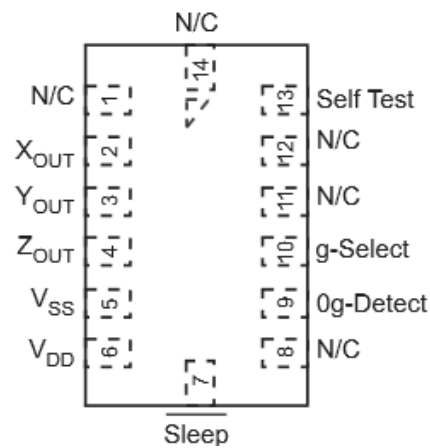
Obr. 2.4 – Akcelerometr MMA7361

#### Parametry

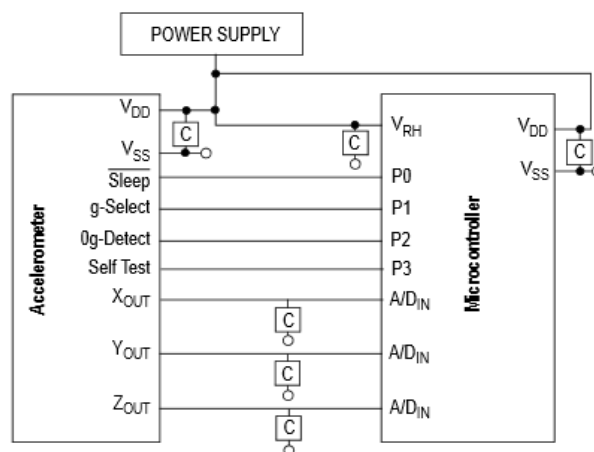
- Nastavitelná sensitivita (1,5 g; 6 g)
- Rozměry desky: 28 mm x 17 mm



- Nízká spotřeba proudu: 400  $\mu\text{A}$
- Nízká spotřeba proudu při sleep módu (režim spánku): 3  $\mu\text{A}$
- Nízké provozní napětí: 2,2 V – 3,6 V
- Vysoká sensitivita při nastavení 1,5 g: 800 mV/g
- Integrovaná úprava signálu s dolním pásmovým filtrem
- Nízká cena produktu
- Detekce pádu
- Schopnost okamžité funkce po zapnutí
- Robustní design
- Vysoká odolnost obvodu



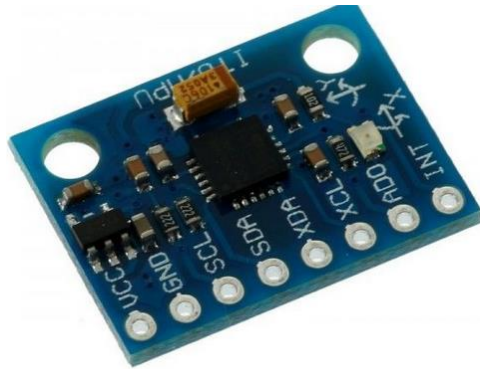
Obr. 2.5 – Schéma pinů akcelerometru



Obr. 2.6 – Schéma zapojení akcelerometru k mikrokontroléru

### 2.2.3 Gyroskop GY 521

Pro výpočet aktuálního úhlového vychýlení a úhlového zrychlení balančního robota byl zvolen dvouosý gyroskop GY 521 na obr. 2.7, pro určení vychýlení je potřebná pouze osa y, princip výpočtu uveden v kapitole 1.3.2. Gyroskop je připojen k mikrokontroléru I2C sběrnici.



Obr. 2.7 – Gyroskop GY 521

#### Parametry

- Vysoká stabilita při přehřátí
- Nízká spotřeba proudu: 3,6 mA
- Široký rozsah operační teploty: (-40 °C – 85 °C)
- Nízké provozní napětí: 2,375 V – 3,46 V
- Integrovaný nízko úroňový filtr
- Měřicí rozsah  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000$  °/sec
- Integrovaný 16 bitový převodník
- Dva oddělené výstupy pro každou osu (X, Y)
- Umožňuje přepnutí do úsporného módu odběru proudu: 5  $\mu$ A
- Vestavěný self-test (samostatná kontrola obvodu po zapnutí)
- Schopnost okamžité funkce po zapnutí

### 2.2.4 Akumulátor

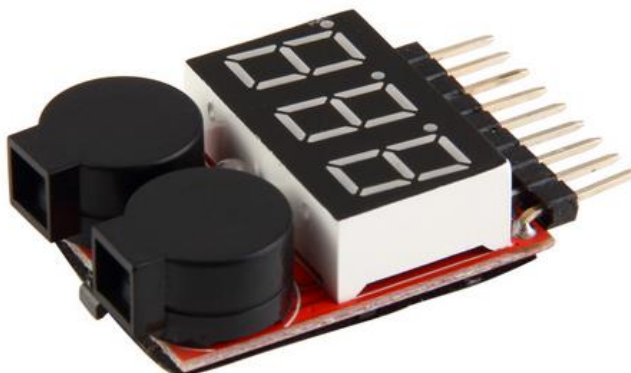
Akumulátor firmy RAY třetí generace na obr. 2.8 je použit pro napájení stejnosměrných motorů. Baterie má kapacitu 2700 mAh a stejnosměrné napětí 14,8 V. Kapacita baterie by měla vydržet minimálně 3 hodiny plného provozu robota. Akumulátor je čtyř-čláňková Li-Poly baterie, která je na trhu nejlepším druhem pro stabilitu proudu po celou dobu vybíjení baterie. Jednou z nevýhod je riziko podvybití akumulátoru, hodnota plně

nabitého článku je od 3,8 V do 4,2 V - maximum, hodnota článku nesmí poklesnout pod 2,8 V, neboť by se baterie zničila.



Obr. 2.8 – Akumulátor

Z důvodů rizika podvybití jednotlivých článků akumulátoru byl přidán hlídací obvod na obr. 2.9 se zvukovou signalizací, LiPo alarm pro 2-8 článků je miniaturní digitální voltmetr s třímístným LED sedmi-segmentovým displejem pro zobrazování napětí na jednotlivých článcích baterie. Jakmile hodnota napětí na článku poklesne pod nastavenou minimální hranici, ozve se alarm, který indikuje nutnost nabití celé baterie.



Obr. 2.9 – Akumulátorový alarm

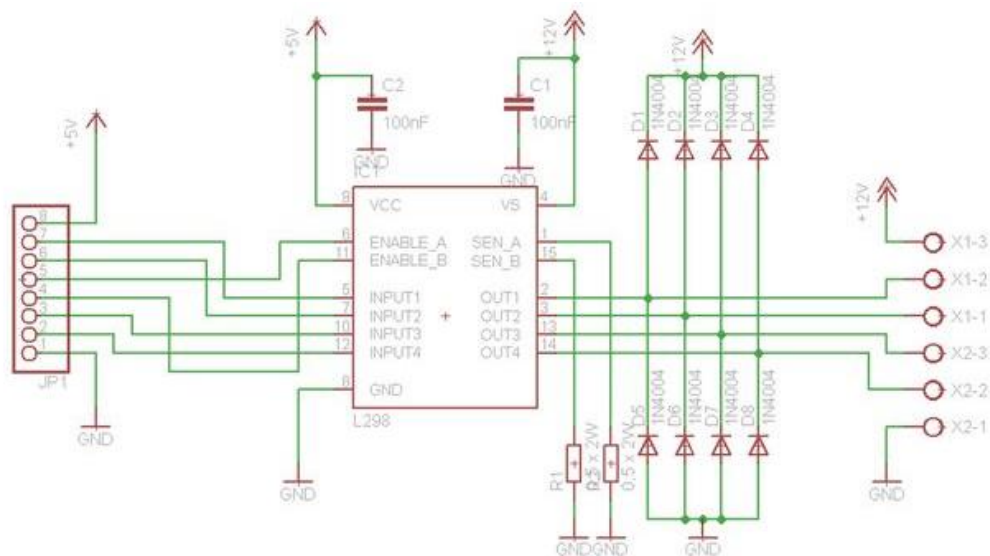
### 2.2.5 H můstek

Dvojité H můstek pro ovládání motorů je realizovaný integrovaným obvodem L298N uloženým na plošném spoji desky na obr. 2.10. Obvod je velmi často používán při stavbě malých mobilních robotů, protože je levný a má výborné vlastnosti. Pro řízení směru otáčení jsou využity dva digitální piny pro jeden motor, tedy pro 2 motory 4 digitální piny INPUT 1-4 na obr. 2.11, princip řízení směru otáčení popsán v kapitole 1.10. Pro řízení rychlosti otáčení

PWM modulací jsou připojeny piny ENABLE A a B k řídicí jednotce. V řídicí jednotce je vypočtena délka a šířka PWM impulsu pro jednotlivé periody řízení a také určen směr otáčení k docílení stability systému. H můstek řízen těmito signály posílá řídicí impulzy stejnosměrným motorům. Vstupní napětí je kompatibilní s vývojovým kitem Arduino Uno.



Obr. 2.10 – H můstek



Obr. 2.11 – Schéma H můstku

### Parametry

- Čip: L298N
- Řídicí napětí: 5 V
- Řídicí proud: 0 mA - 36 mA
- Elektrické napětí: 5 V – 35 V
- Elektrický proud: 2 A
- Maximální výkon: 25 W

- Rozměry desky: 43 mm x 43 mm
- Řízení 2 motorů zároveň
- Řízení stejnosměrných i krokových motorů
- Jednoduchá realizace připojení obvodu k Arduinu
- Nízká cena

### 2.2.6 Stejnosměrný motor

Jako přímý akční člen působící na stav soustavy byl zvolen stejnosměrný motor s převodovkou, jejíž převodový poměr je 30:1 na obr. 2.12. Samostatný stejnosměrný motor by neměl při potřebných malých rozměrech a nízké hmotnosti dostačující krouticí moment, proto byla potřebná převodovka. Převodovka snižuje otáčky motoru a zvyšuje krouticí moment na hřídeli. Byl vybrán motor typu 12 V tedy se jmenovitým vstupním napětím o hodnotě 9-14 V, který je kompatibilní s napětím akumulátoru.



Obr. 2.12 – Stejnosměrný motor s převodovkou

#### Parametry

- Jmenovité zatížení: 88 ot/min
- Krouticí moment při jm. zatížení: 1088 g/cm
- Odběr el. proudu při jm. zatížení: 145 mA
- Chod naprázdno: 100 ot/min
- Odběr el. proudu bez zatížení: 20 mA
- Rozběh: 1050 mA, 8980 g/cm
- Rozměry:  $d = 24,4 \text{ mm} \times 53,9 \text{ mm}$
- Nízký poměr ceny/výkonu

### 2.2.7 Kola robota

Vybraná modelářská kola s průměrem 11 cm na obr. 2.13 jsou vyrobena z tvrdé pryže, která zvyšuje adhezi s povrchem, nedochází tak k nežádoucím prokluzům mezi kolem a podlahou. Kola jsou k hřídelím motorů připevněna unašeči obr. 2.14, ty zajišťují pevné a neprokluzující spojení mezi hřídelí motoru a kolem.



Obr. 2.13 – Kolo robota

Rychlost robota určuje rychlost otáčení motorů a průměr zvolených kol. Rychlost otáčení motoru při zatížení  $v_m = 88$  ot/min a průměrem kol  $d = 11$  cm.

Dle vzorce (2.1) přepočteme na rychlost robota  $v_r$  v cm/s:

$$v_r = 2\pi \frac{d}{2} \cdot \frac{v_m}{60} = 50,684 \quad (2.1)$$

Dostaneme tedy výpočet maximální rychlosti robota přibližný půl metru za sekundu, to by měla být dostačující rychlost pro stabilizaci systému.



Obr. 2.14 – Unašeč hřídele

### 2.2.8 Ultrazvukový senzor HC-SR04

Pro senzor měřící vzdálenost překážek před robotem byl vybrán ultrazvukový senzor HC-SR04, na obr. 2.15 je kompatibilní s platformou Arduino Uno. Tento senzor se pomocí 4 pinů lehce připojí k řídicí jednotce a řídicímu systému poskytne informaci o tom, co se nalézá

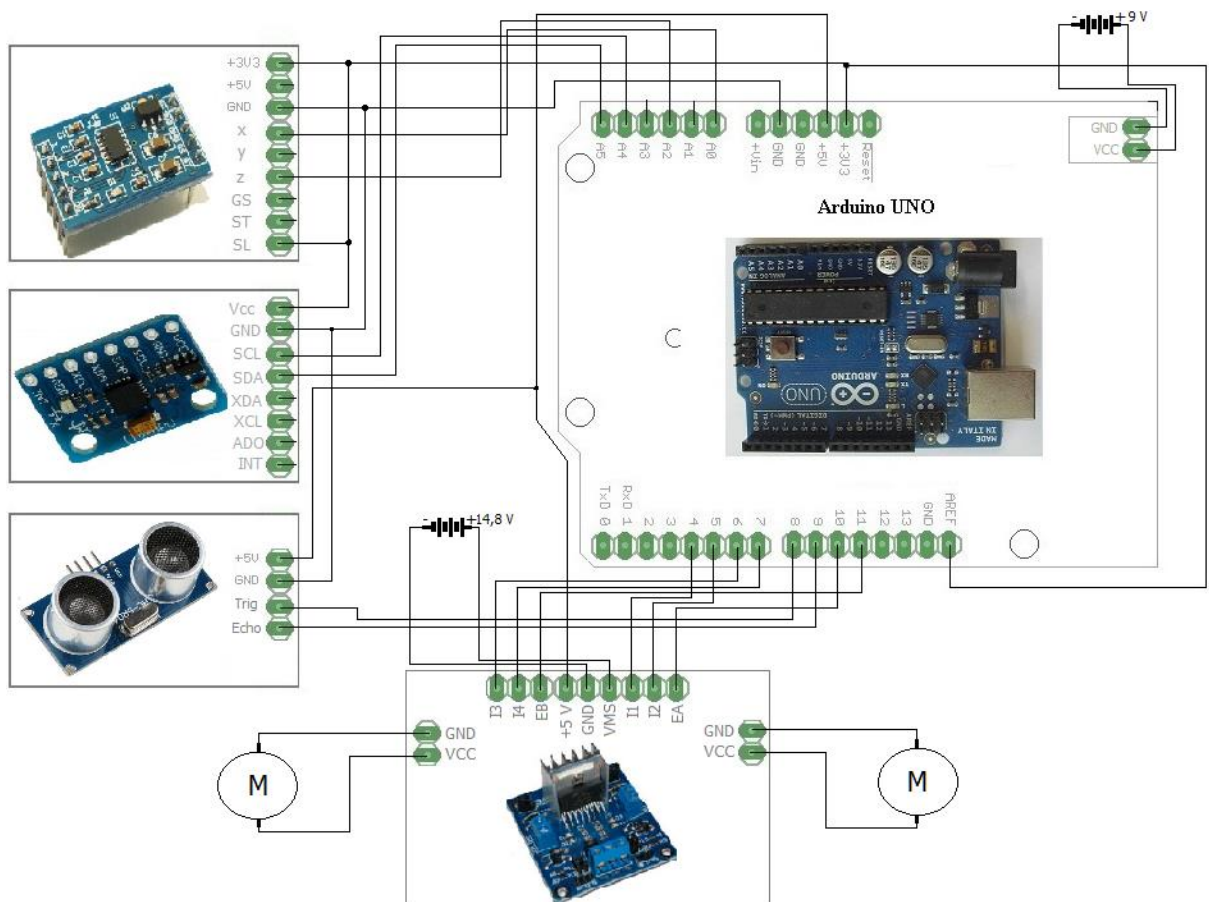
před robotem. Při vytváření programu je myšleno na použití dat z tohoto senzoru pro balancování, a vyhýbaní robota překážkám při jeho jízdě v prostoru. Princip ultrazvukového senzoru popsán v kapitole 1.12.



Obr. 2.15 – Ultrazvukový senzor HC-SR04

### 2.2.9 Schéma zapojení prvků

Řídicí systém je zapojen dle schématu na obr. 2.16 a je napájen dvěma akumulátory. Akumulátor Li-Po 14,8 V pro napájení motorů, a 9 V alkalickou baterií pro napájení kitu Arduino Uno a senzorického systému.



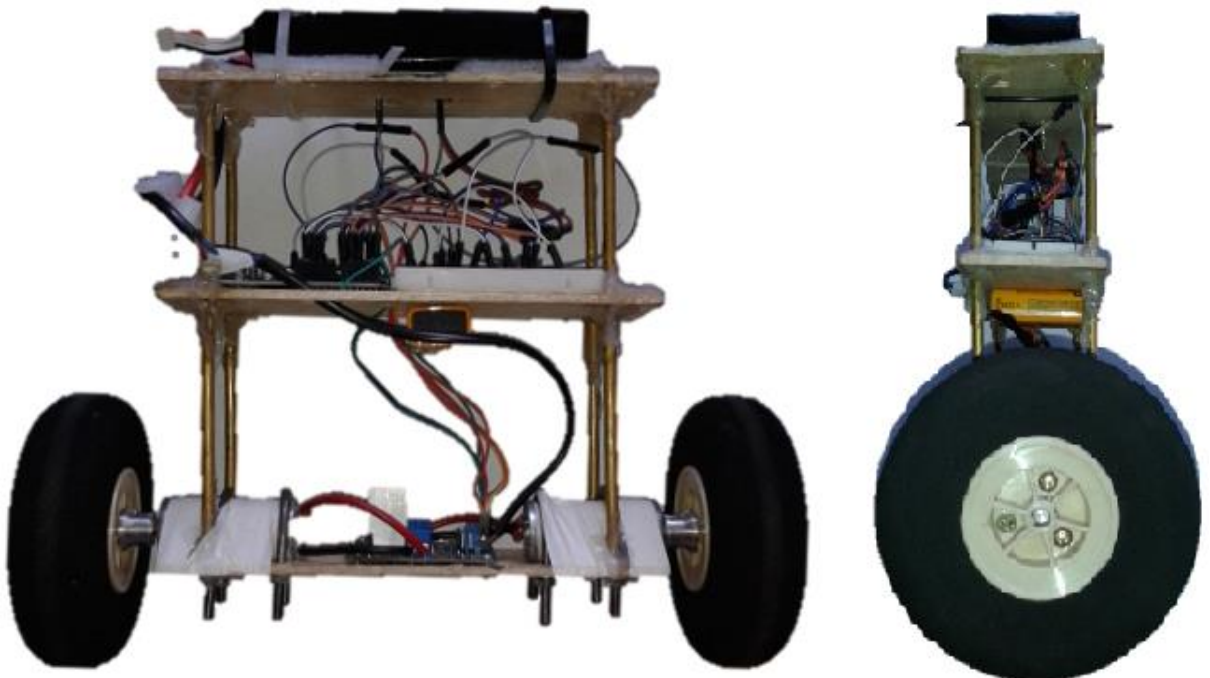
Obr. 2.16 – Schéma zapojení řídicího systému



## 2.3 Výsledná konstrukce robota

Po praktickém zkonstruování robota a zapojení senzorů k řídicí jednotce dle obr. 2.16 je možno přistoupit k jeho oživení, testování funkčnosti jednotlivých komponent a návrhu řídicího algoritmu. Balanční robot byl postaven dle návrhu v předešlých kapitolách a výsledný vzhled je na obr. 2.17.

Při praktickém testování se ukázalo, že při vysoké úhlové rychlosti horní těžké části robota docházelo k vychýlení robota, až na takovou úroveň, kdy rychlost motorů nebyla dostačující pro dosažení stability. Oproti obr. 2.17 bylo přeneseno těžiště robota směrem dolů, pomocí přesunutí akumulátoru z horní na spodní desku. Přenesením těžiště se zmenšila úhlová rychlost a bylo dosaženo lepší stability robota.



Obr. 2.17 – Realizace balančního robota

## 2.4 Filtrace dat

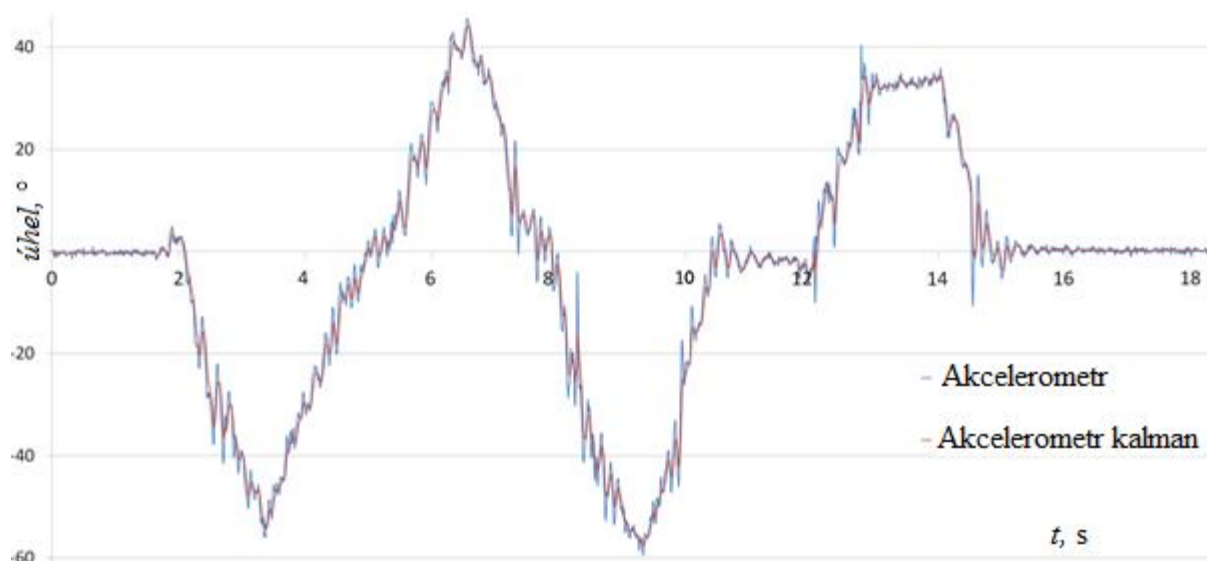
### 2.4.1 Kálmánova filtrace

Obr. 2.18 a 2.19 zobrazují data ze senzoru s porovnáním s Kálmánovou filtrací dat z daného senzoru, kvůli zjištění jestli je filtrace pro daný senzor přínosná či nikoliv.

Kálmánova filtrace byla použita pro odfiltrování poruch na měřeném výstupu soustavy. Na obr. 2.18 je Kálmánova filtrace vypočteného úhlu vychýlení z os  $x$  a z akcelerometru. Data z akcelerometru jsou kvůli vzniku dynamického zrychlení při pohybu

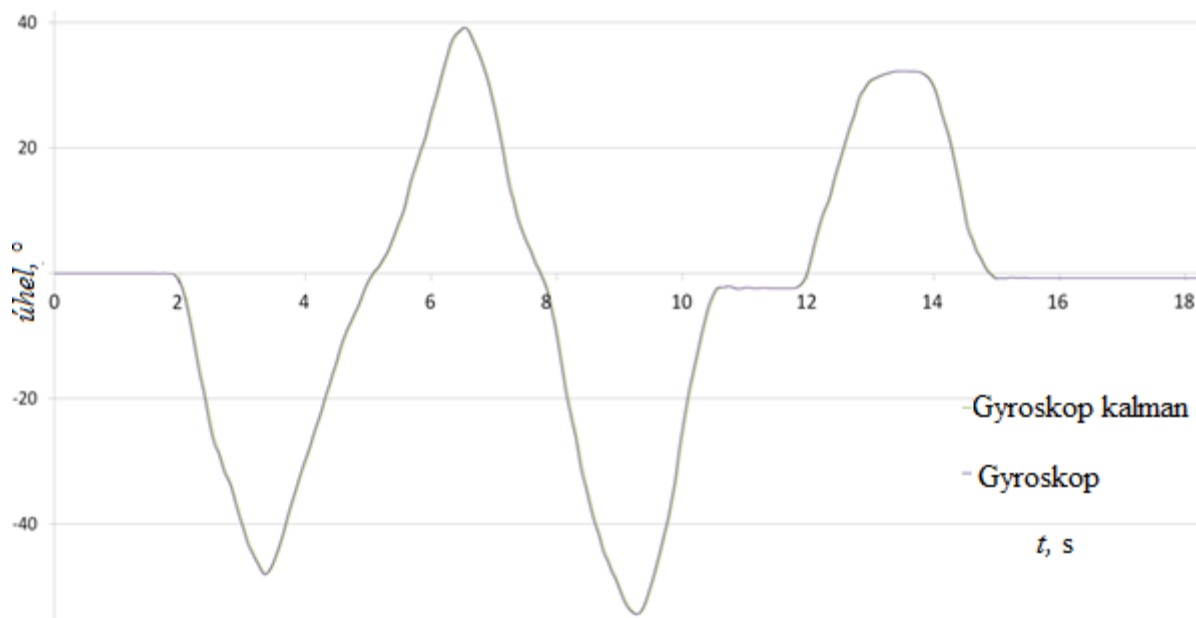


soustavy zašuměná, a proto bylo nutné použít filtraci dat. Kálmánova filtrace přinesla zlepšení měřených dat z akcelerometru.



Obr. 2.18– Kálmánova filtrace akcelerometru

Poté byla provedena Kálmánova filtrace dat z gyroskopu a je patrné na obr. 2.19, že data jsou přesná a nezašuměná, tedy bez chybového signálu, proto není nutné použít Kálmánovu filtraci na měřená data z gyroskopu.

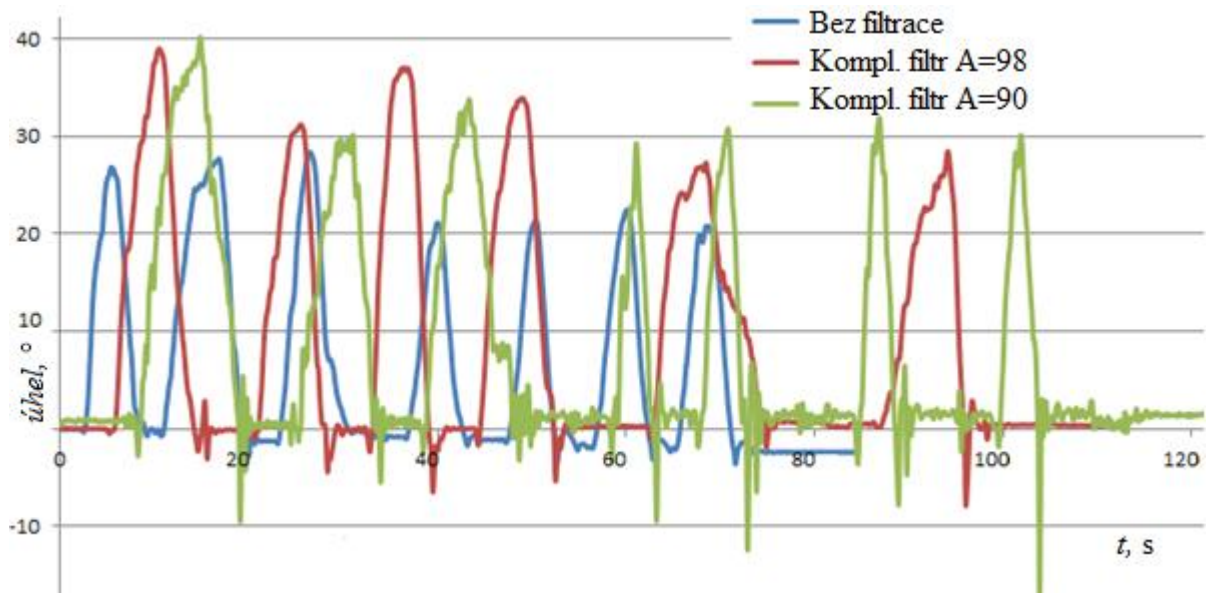


Obr. 2.19 – Kálmánova filtrace gyroskopu

Data z gyroskopu obsahují rostoucí drift, ten je nutné filtrovat pomocí komplementárního filtru.

### 2.4.2 Komplementární filtr

Na obr. 2.20 jsou data po sloučení komplementárním filtrem, jehož nastavení je závislé jen na parametru  $A$  v rovnici (1.24). Byl otestován nejlepší poměr mezi propustí zakmitaných dat z akcelerometru a přesných dat z gyroskopu s rostoucím chybovým driftem. Modrá křivka jsou sloučená data bez filtrace, na nichž je vidět malé zakmitání akcelerometru, ale velký rostoucí drift. Tento rostoucí drift byl odstraněn komplementárním filtrem, zelená křivka s konstantou  $A=90$ , takto nastavená filtrace kompenzuje driftovací chybu, ale je až příliš náchylná na výchyly z akcelerometru. Dokonalým kompromisem mezi daty z akcelerometru a gyroskopu se zdá nastavení parametru  $A=98$  (červená křivka), toto nastavení odstraňuje kmitání akcelerometru a kompenzuje drift gyroskopu.

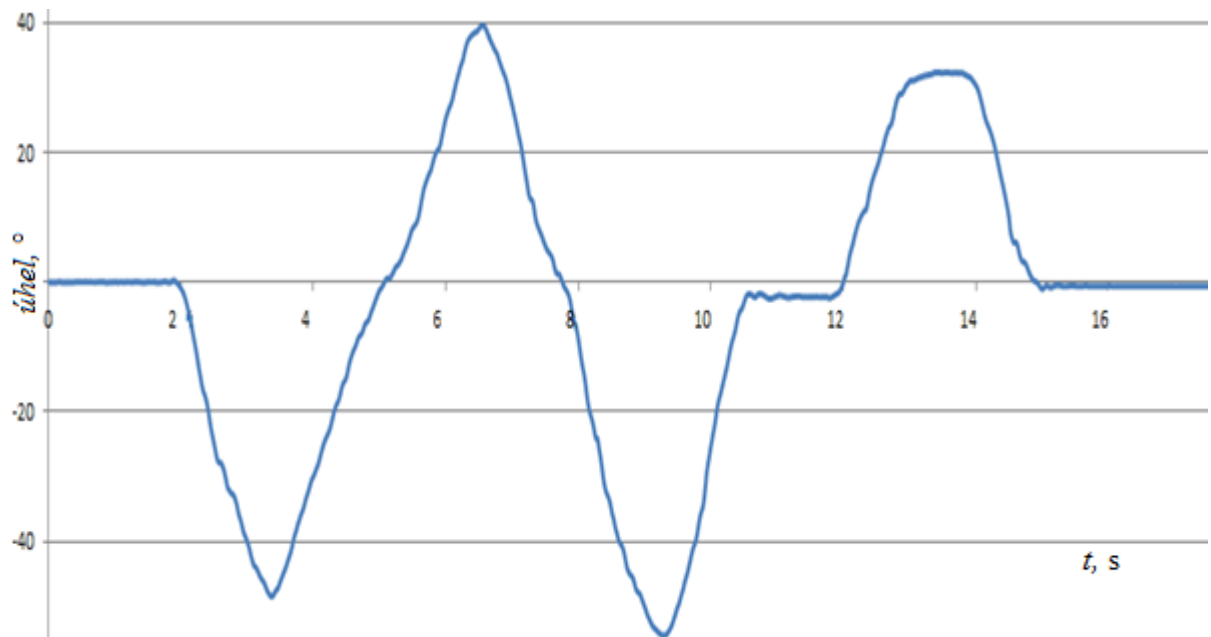


Obr. 2.20 – Nastavení parametru a komplementárního filtru

Při dosazení parametru  $A$  do rovnice (1.24) za dolní a horní propust', vyjde rovnice (2.2) pro výpočet algoritmu komplementárního filtru:

$$Výsl_{úhel} = 0,98 \cdot (Výsl_{úhel} + gyrData \cdot T) + 0,02 \cdot akcData \quad (2.2)$$

Takto upravená a odfiltrovaná data na obr. 2.21 jsou připravena k výpočtu akčního zásahu PSD regulátorem v řídicí jednotce.



Obr. 2.21 – Výsledná data z komplementárního filtru

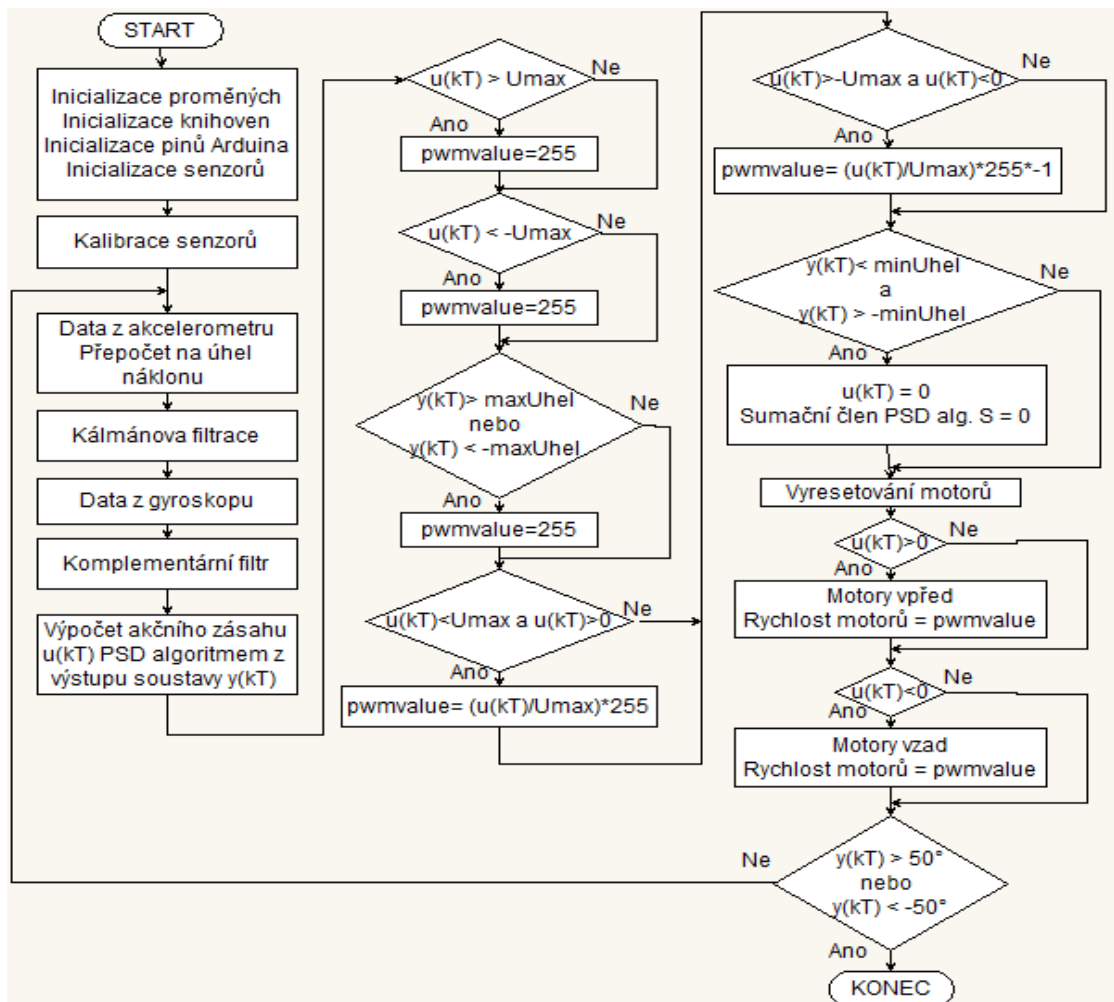
Výsledná data po provedení všech filtrací dokonale rekonstruuji reálný pohyb soustavy, který byl pro toto měření experimentálně prováděn. Reálný balanční robot byl nakláněn o cca 40° do jednotlivých stran, jak ukazuje obr. 2.21 s měřenými daty.

## 2.5 Algoritmus regulace

Algoritmus regulace je rozložen do dvou pracovních metod, programování bylo provedeno v programovém prostředí pro Arduino Uno a psáno jazykem C. Hlavní program se skládá ze dvou metod `main()` a `loop()`. Metoda `main` slouží pro první konfiguraci proměnných a jejich parametrů a druhá metoda `loop` je nekonečná smyčka, v níž probíhá hlavní část programu algoritmu balancování. Algoritmus balancování má za úkol udržet soustavu v rovnovážné poloze, tedy stabilní poloze, definované jako nulová odchylka od stabilní polohy. Algoritmus jízdy je určen k autonomnímu pohybu robota prostorem a využívá algoritmu balancování k udržení stability při jízdě. K jízdě prostorem je potřeba znát informaci o stavu prostoru před robotem, aby se vyhnul případným překážkám. Je-li ultrazvukovým senzorem identifikována překážka v dráze robota, je volána funkce algoritmu jízdy pro změnu směru. Celé podrobné návrhy algoritmů budou popsány v následujících kapitolách 2.5.1 a 2.5.2.

## 2.5.1 Algoritmus balancování

Algoritmus pro balancování okolo žádané hodnoty je založen na výpočtu akčního zásahu  $u(kT)$  z naměřených dat výstupu balančního robota  $y(kT)$ , z tohoto výpočtu je určen směr otáčení kol robota a rychlost otáčení motorů. Algoritmus na obr. 2.22 pro balancování robota je diskrétní algoritmus probíhající v časových periodách  $T$ . V hlavní části programu jsou provedeny inicializace proměnných parametrů, knihoven, používaných pinů Arduino a inicializace měřicích senzorů. Kalibrace senzorů je provedena snímáním nulové výchylky (tzv. offset) pro daný senzor, která je pak odečtena ve výpočtu úhlu, tj. např. akcelerometr bude měřit kladné i záporné zrychlení, to samé je provedeno i pro data z gyroskopu, který měří úhlovou rychlost.



Obr. 2.22 – Vývojový diagram algoritmu balancování

Výpočet dat z akcelerometru a gyroskopu proveden dle principu v kapitolách 1.3.1 resp. 1.3.2, k přepočtu z úhlové rychlosti gyroskopu na úhel natočení gyroskopu bylo použito numerické náhrady integrace, konkrétně bylo použito lichoběžníkové pravidlo popsané v

kapitole 1.5.1. Dále probíhá filtrační část, ve které jsou data z akcelerometru odfiltrována Kálmánovým filtrem a poté i s daty z gyroskopu odfiltrována komplementárním filtrem. Odfiltrovaná data od šumu  $y'(kT)$  jsou použita pro výpočet akčního zásahu  $u(kT)$  diskretním PSD algoritmem na obr. 2.23.

```
E_min=E_akt;|
E_akt=W-uhel_vychyleni2; //e=w-y regulační odchylka
S = S + ((E_akt+E_min)/2); // realizace sumy S členu PSD reg.
U=kp*E_akt+T/Ti*S+Td/T*(E_akt-E_min); //rovnice PSD
Serial.println(U);
```

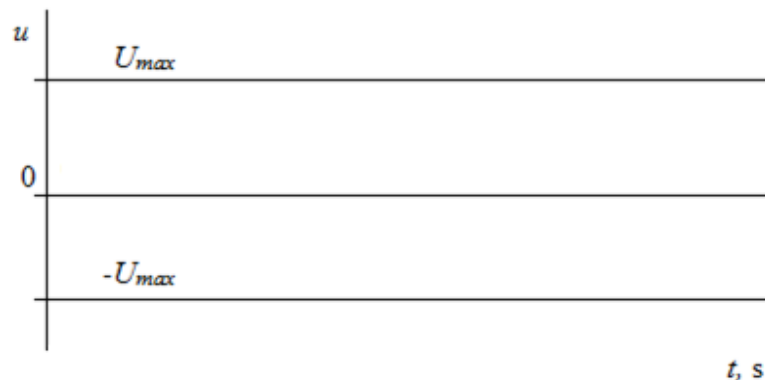
Obr. 2.23 – Realizace PSD algoritmu jazykem C

Nejprve se uloží do minulé regulační odchylky regulační odchylka aktuální a je realizován posun o jeden cyklus zpět. Poté je vypočtena aktuální regulační odchylka závislá na žádané hodnotě  $w(kT)$  a aktuálním výstupu soustavy  $y(kT)$ . Výpočet aktuální regulační odchylky spolu s realizací sumy  $S$  sumačního členu je využit pro samotný výpočet akčního zásahu rovnicí pro PSD regulátor dle rovnice (21), s konstantami  $k_p$ ,  $T_I$  a  $T_D$ . Sumační člen je realizován numerickou náhradou, konkrétně lichoběžníkovým pravidlem. Je-li vypočten aktuální akční zásah, lze přistoupit k řízení rychlosti a směru otáčení motorů. Dle (ARDUINO, 2012), lze motory řídit pomocí PWM pinů na desce Arduino Uno, které nabývají hodnot 0-255 pro 0-100 % výkon zařízení. Tedy na obr. 2.24 pomocí výrazu pro číslo pinu umožňující PWM modulaci vložíme hodnotu PWM v rozmezí 0-255.

```
analogWrite(pin, hodnotaPWM)
```

Obr. 2.24 – Řízení PWM modulací

Nyní je nutné realizovat převod akčního zásahu na PWM hodnotu, je zvolena maximální hodnota akčního  $U_{max}$ , která bude určovat maximální hodnotu PWM dle obr 2.25.



Obr. 2.25 – Maximální hodnota akčního zásahu

Pro kladný akční zásah menší než  $U_{max}$  je hodnota PWM vypočtena dle rovnice (2.3)

$$PWMhodnota = \left( \frac{u(kT)}{U_{max}} \right) \cdot 255 \quad (2.3)$$

Je-li hodnota  $u(kT)$  menší jak  $U_{max}$ , vyjde vždy číslo menší než jedna tzn. do  $PWMhodnota$  se vloží řídicí impuls pro motory mezi 0-255. Pro hodnotu  $u(kT) > U_{max}$  je do hodnoty PWM vložen maximální impuls pro otáčení motorů  $PWMhodnota = 255$ . Hodnota  $U_{max}$  je zvolena vzhledem k reálnému modelu balančního robota a to na tak velkou hodnotu, aby robot byl schopný vybalancovat velký náklon při vychýlení soustavy z rovnovážného stavu. V mezích mezi  $u(kT)$  a  $U_{max}$  je řízení rychlosti motorů ponecháno na PSD regulátoru a nad touto hranicí jsou motory buzeny maximálním signálem PWM pro stabilizaci velkého náklonu. Pro záporný akční zásah větší než  $-U_{max}$  je  $PWMhodnota$  vypočtena dle rovnice (2.4) a stejného principu jako u kladného akčního zásahu, jen s rozdílem převedením na kladné číslo.

$$PWMhodnota = \left( \frac{u(kT)}{U_{max}} \right) \cdot 255 \cdot (-1) \quad (2.4)$$

Pro realizaci směru otáčení je využita samotná hodnota akčního zásahu, jelikož akční zásah působí proti vychylování soustavy lze z něj určit směr otáčení motorů a to jednoduše, je-li  $u(kT) > 0$  motory vpřed nebo  $u(kT) < 0$  motory vzad.

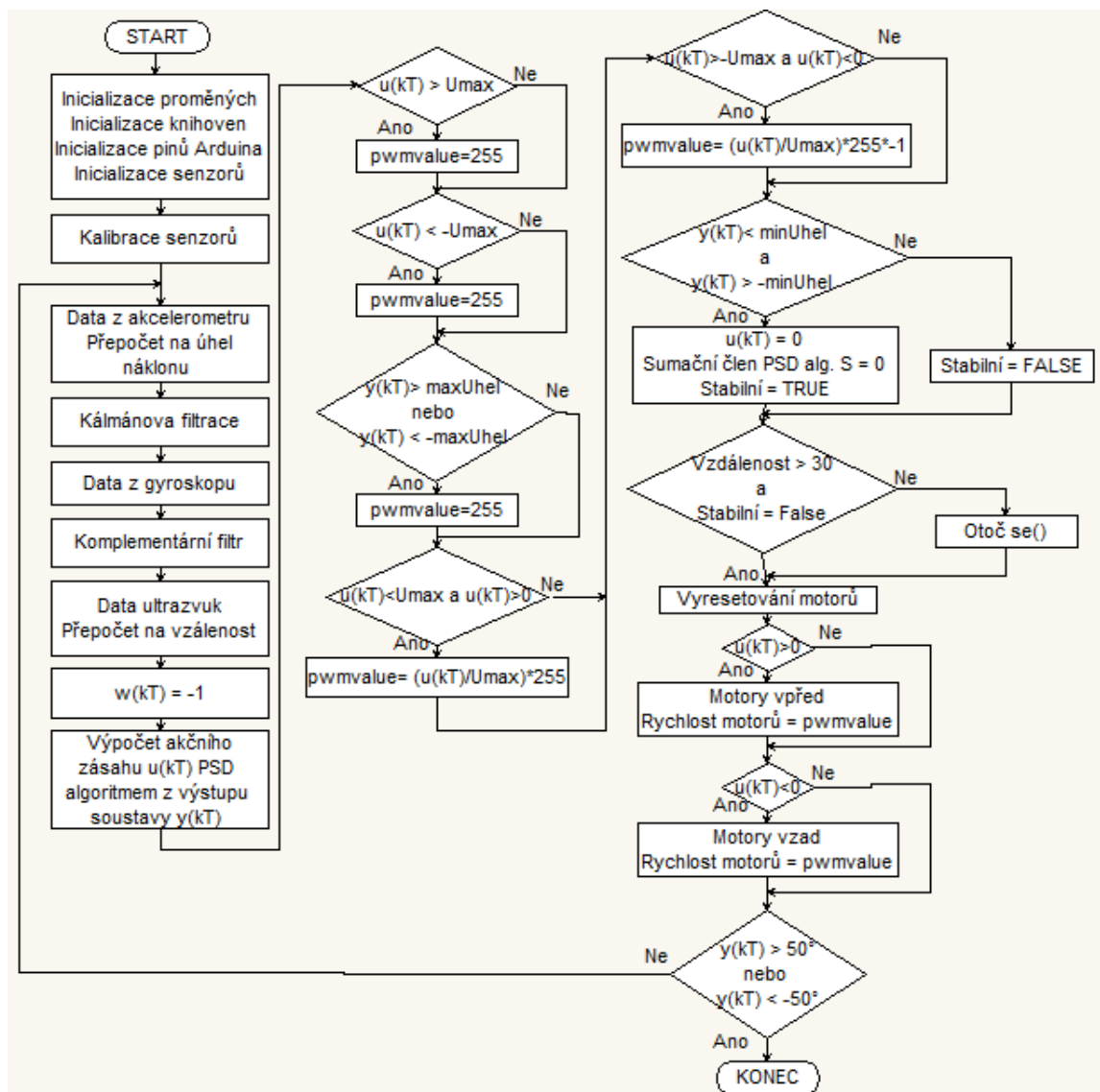
Kvůli zlepšení stability byl zvolen minimální úhel vychýlení, pro který je nutný zásah, motorů, tedy je-li hodnota  $y(kT)$  menší jak zvolený minimální úhel hodnota akčního zásahu  $u(kT)$  je vynulována. Hodnota minimálního úhlu byla zvolena na  $0,5^\circ$ , tzn. řídicí systém v rozsahu vychýlení od  $0,5^\circ$  do  $-0,5^\circ$  (tzv. pásmo stability) nevysílá povely motorům pro stabilizaci.

Vypočtená  $PWMhodnota$  pro řízení rychlosti a směru otáčení motorů je odeslána jednotlivým motorům, které udržují stabilitu systému. Zdrojový kód balančního algoritmu uveden v příloze A.

### 2.5.2 Algoritmus jízdy

Pro algoritmus řízení robota v prostoru je důležité získat informaci z ultrazvukového senzoru o překážkách před robotem, a případného otáčení se robota. Pro algoritmus jízdy je defaultně použit algoritmus balancování, jak uvádí obr. 2.26, ve kterém musí dojít ke změnám, aby robot vykazoval autonomní charakter a dokázal se sám pohybovat v prostoru

a nedocházelo k narážům do překážek a následného jeho pádu. Řízení směru robota je založeno na vstupní žádané hodnotě, která ovlivňuje jeho náchylnost k jízdě. K tomuto zjištění přispěl balanční algoritmus, ve kterém se při vychýlení robota dochází k jeho stabilizování pomocí motorů a robot se pohybuje směrem vychýlení robota k dosažení stability. Pro algoritmus jízdy je dle tohoto zjištění použita žádaná nastavena na hodnotu  $w(kT) = -1$ , tato hodnota zajistí plynulý chod robota vpřed. Změnou žádané hodnoty lze dosáhnout požadovaného směru jízdy robota, nebo rychlosti zvýšením na větší hodnotu tzn. pro větší výchylku je potřebná větší rychlost motorů k docílení žádané hodnoty.



Obr. 2.26 – Vývojový diagram algoritmu jízdy

Robot tedy stále udržuje směr jízdy vpřed s téměř konstantní rychlostí. Na začátku programu by mělo dojít k přepočtu na vzdálenost k nejbližšímu objektu před robotem z dat ultrazvukového senzoru, v následujících krocích programu je rozhodnuto o možné kolizi

s objektem a vyvolá se funkce na změnu směru otoč se(). Tato funkce otočí robota o předem definovaný úhel. Funkce je založena na diferenciálním řízení motorů, oba motory se točí stejným směrem a dochází tak ke kruhovému pohybu, tedy rotaci celého robota kolem osy y. Pro otočení o 90°, by se funkce otoč se() řídila dle rovnice (2.5) a programová realizace v kódu pro Arduino je zobrazena na obr. 2.27:

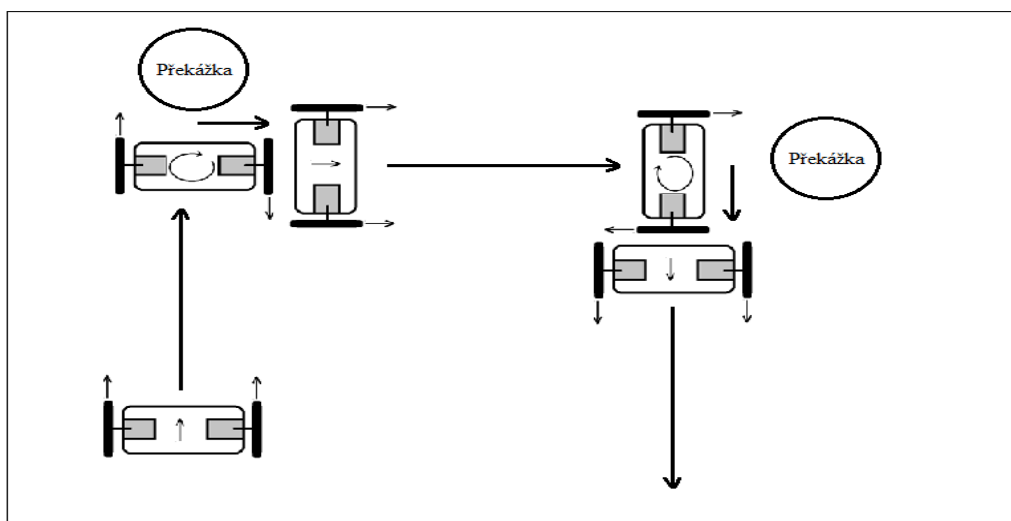
$$cas = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot r}{v_r} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot 13,5}{50,684} = 0,83 \quad (2.5)$$

Kde *cas* je časová hodnota zpoždění v sekundách na obr. 2.27, zajišťující běh motorů po celou dobu realizace otáčení o  $\frac{\pi}{2} \cdot r$  tedy 90°, změnou této hodnoty lze vypočítat jakékoliv časové zpoždění pro potřebný úhel natočení s maximálním výkonem motorů  $v_r$ .

```
//otocění se
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(5, LOW);
digitalWrite(6, HIGH);
digitalWrite(7, LOW);
analogWrite(10,255);
analogWrite(11,255);
delay(cas)
```

Obr. 2.27 – Realizace otáčení robota v jazyce C pro Arduino

Změnou žádané hodnoty z 0 na -1°, přidáním funkce otoč se() a zjišťováním překážek před robotem lze tohoto robota s takto navrženými změnami uvažovat jako autonomního



Obr. 2.28 – Autonomní pohyb robota v prostoru



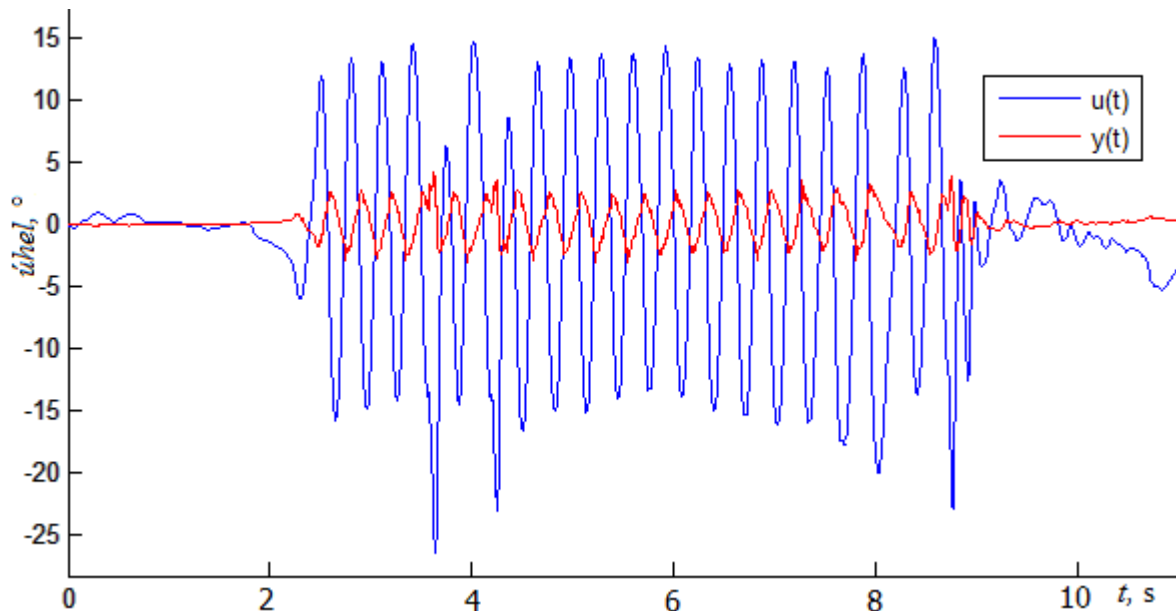
robota s nezávislým pohybem v prostoru zobrazeným na obr. 2.28 a řízeným řídicím systémem na základě navrženého algoritmu jízdy. Naprogramované funkce a video balancujícího robota jsou na CD v příloze C.

## 2.6 Nastavení regulátoru

Po praktické konstrukci balančního robota mohlo být přistoupeno k nastavení PSD regulátoru. PSD regulátor určuje akční zásah z měřených dat odfiltrovaných od šumu a statického driftu gyroskopu. K nastavení regulátoru byla zvolena metoda nastavení dle Zieglera-Nicholse, popsána v kapitole 1.4.2. Na obr. 2.29 je reakce balančního robota na kritické zesílení  $r_{0k} = 0,09$ , které bylo získáno experimentálně, tzn. hodnota zesílení byla měněna, dokud reálná soustava nekmitala s konstantní amplitudou a konstantní kritickou periodou kmitů  $T_k = 0,2625$  s. Podle kritického zesílení  $r_{0k}$  a kritické periody  $T_k$  dle tab. 1.2, byly vypočteny optimální konstanty PSD regulátoru, které jsou vyčísleny v tab. 2.2.

Tab. 2.2 – Konstanty PSD regulátoru

P	0,054
S	0,1312
D	0,0328

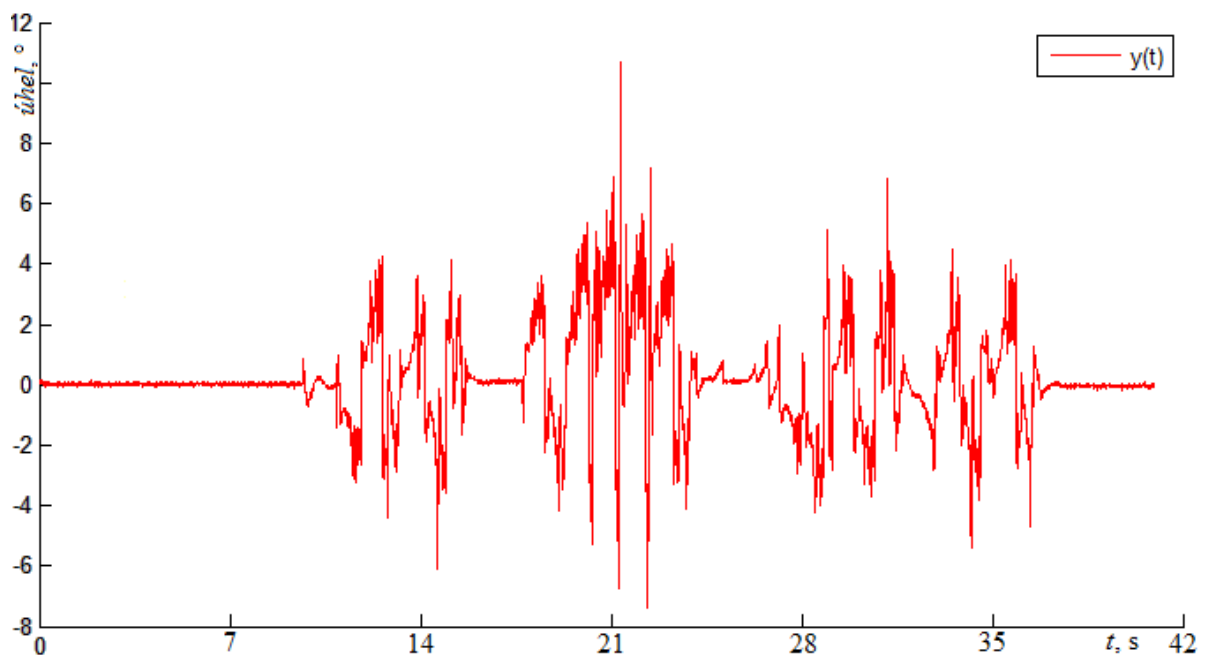


Obr. 2.29 – Výstup reálné soustavy pro nastavení PSD regulátoru

### 2.6.1 Testování balančního algoritmu s PSD regulátorem

Pro navržený balanční algoritmus byl navržen pokus pro otestování stabilizace. Balanční robot s vhodným nastavením pro PSD regulátor byl otestován na neklouzavém

povrchu tedy koberci, kvůli korekci a doladění konstant pro stabilizaci. Robot s tímto nastavením byl stabilní, ovšem občas docházelo k jeho pádu, a proto byla upravena konstanta  $S$ , aby se předešlo nežádoucímu pádu robota. Sumační konstanta PSD regulátoru byla zvětšena na hodnotu  $S = 0,9312$ , tímto zvětšením byla příznivě ovlivněna schopnost robota předejít pádu. Při dalším testování byl robot ponechán v režimu stabilizace, aby byla vyzkoušena jeho schopnost přesného balancování, ani po hodině chodu robota nedošlo k pádu. Tímto bylo získáno přesné nastavení PSD regulátoru pro stabilizaci robota a byl úspěšně splněn hlavní cíl práce. Obr. 2.30 znázorňuje dlouhodobou stabilizaci robota při balancování navržených konstantách PSD regulátoru a řídicího algoritmu balancování v předešlé kapitole. V časech cca 10, 17 a 26 sekund byl robot vychýlen ze stabilní polohy a byla sledována jeho odezva na poruchový impuls a rychlost stabilizace na obr. 2.30. Z výsledných dat je patrné, že při regulaci byla průměrná odchylka od stabilní polohy cca  $4^\circ$ . Robot se po celou dobu testování udržel v pracovní poloze a po vychýlení byl stabilizačním algoritmem uveden zpět do stabilní polohy s průměrnou dobou regulace 7 sekund.



Obr. 2.30 – Záznam o balancování robota

Nastavení regulátoru je dostatečně citlivé při reakci na chybový signál i na změnu žádané hodnoty. Funkce balančního algoritmu byla ověřena a potvrzena jeho funkčnost.

## **2.7 Použití robota**

Model vytvořený pro tuto práci je experimentální robot sloužící pro další rozvoj této problematiky a sám o sobě nemá žádné rozšířené speciální funkce. Balanční robot by mohl být osazen specifičtější senzorem a mohl být použit pro speciální zaměření, pro které je vhodné úzké a malé tělo robota s flexibilním podvozkem s možností diferenciálního řízení podvozku. Hlavní výhodou balančního robota jsou tedy jeho minimální požadavky na velikost pracovního prostoru.

### **2.7.1 Hlídací robot**

V praxi asi nejvíce použitelný by se zdál hlídací nebo strážný robot, ten by se skládal z odolného těla robota a senzorního systému. Pro detekci osob by byl implementován infračervený senzor pro detekci tepelného záření lidského těla, dále pak zvukový a kamerový pozorovací systém pro detekci překážek a hrozeb. Kamerový systém by sledoval pohybující předměty a na tyto předměty upozorňoval nadřazený systém. Hlídací robot by byl bezdrátově spojen s hlavním nadřazeným vyhodnocovacím systémem, ten by ovládal jednotlivé hlídací roboty.

### **2.7.2 Robot v domácnosti**

Robot pomáhající v domácnosti, by byl navržen jako pomocník, např. nošení zavazadel na svém vrcholu těla. Robot by musel mít velice dobře propracovaný regulátor, nejspíše založený na umělé neuronové síti kvůli změnám parametrů robota při přenesení těžiště zatížením. Senzory detekující překážky a osoby v okolí by robotu zajišťovaly nekolizní pohyb v takto dynamicky se měnícím prostředí. Jedna z nejdůležitějších zásad robota je, při plnění úkolu nesmí ohrozit či omezit člověka. Nevýhodou dvoukolového robota v současné době v domácnosti je nemožnost překonání schodů, pro takto navržené systémy by se mohla kolem schodů postavit lávka kopírující tvar a stoupání schodů a robot by se po ní mohl přesunovat mezi podlažími. Pro interakci s člověkem, lze robota vybavit hlasovým modulem přijímajícím hlasové povely.

### **2.7.3 Prohledávací robot**

Robot by měl téměř stejnou senzorní výbavu jako má hlídací robot, jen by jeho úloha byla jiná. Robot by se specializoval na vyhledávání objektů nebo určitých struktur v místnosti nebo v jiném prostředí.

#### **2.7.4 Požární robot**

Požární robot vybaven sensorickým systémem, obsahující infračervené senzory pro detekci vysokých teplot a kouřové senzory, pro detekci chemických látek vznikajících při hoření. Mobilita robotu zajišťuje oproti statickým protipožárním sensorům možnost pokrytí větší plochy a možnost reakce na dynamické změny či možnost okamžitého zásahu hasicím přístrojem umístěným v těle robota.

### 3 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl návrh a realizace nestabilního dvoukolového podvozku robota.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je popsána rešerše zadaného tématu a teoretické znalosti důležité pro návrh a realizaci balančního robota, založeném na principu inverzního kyvadla. Byla provedena matematicko-fyzikální analýza inverzního kyvadla a pomocí Lagrangeových rovnic odvozena pohybová rovnice dynamiky inverzního kyvadla. Při návrhu řídicího systému bylo využito diskrétního systému automatického řízení založeným na PSD regulátoru s navrženým diskrétním algoritmem pro řízení stabilizace a pohybu robota. V této části jsou popsány filtrační metody, které patří mezi nejdůležitější části řídicího systému balančního robota.

V praktické části je popsána realizace navrženého dvoukolového podvozku, tedy navrženého balančního robota. Pro realizaci bylo využito cenově dostupných senzorů, akčních prvků a řídicí jednotky Arduino Uno s mikrokontrolérem firmy Atmel. Z popsáných součástí použitých pro konstrukci robota byl robot fyzicky realizován na obr. 2.17, po fyzické konstrukci a oživení všech součástí robota bylo přistoupeno k zpracování a filtraci dat ze senzorů robota, které jsou pro práci zásadní. Z použitých filtračních metod se osvědčil komplementární filtr. Po získání potřebných dat byl navržen a naprogramován algoritmus PSD regulátoru a byl realizován budicí signál pro řízení stejnosměrných motorů. Nastavení parametrů PSD regulátoru bylo provedeno metodou Zieglera-Nicholse na reálné soustavě.

V této práci byl navržen a realizován senzorický systém se zvolenými filtračními metodami, fyzická konstrukce robota, fyzická konstrukce řídicího systému se softwarově řešeným PSD regulátorem a návrhem algoritmů pro balancování a řízení pohybu robota. Navržený řídicí algoritmus by měl umožňovat robotu tyto schopnosti:

- Balancování okolo žádané pozice
- Schopnost pohybu robota vpřed a vzad
- Otáčení robota o pevně definovaný úhel
- Autonomní pohyb robota v prostoru
- Vyhýbání se překážkám

Vyhodnocením experimentem bylo dosaženo příznivých výsledků při balancování robota v prostoru okolo žádané hodnoty  $0^\circ$ , robot při této činnosti osciluje okolo žádané hodnoty. Vychýlením ze stabilního stavu je dosaženo pojezdu robota směrem vpřed a vzad. Při

testování funkce pro otočení - otoč se(), bylo dosaženo otáčení robota o zvolený úhel, jelikož kola robota se otáčejí protisměrně, nedochází tak k vychylování robota a ten je při otáčení stabilní.

Pro budoucí využití robota v praxi je možné jej vybavit speciálními zařízeními a senzorickým systémem a použít jej jako hlídacího, prohledávacího, požárního nebo robota v domácnosti.

## Seznam použité literatury

- ARDUINO. 2012. Arduino Board Uno. [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>
- BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-7300-020-2.
- CVEJN, J. 2006. *Řízení procesů: Obsah přednášek*. Univerzita Pardubice.
- ELEKTRICKÝ GYROSKOP. 2012. *Embedded system news* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://embeddedsystemnews.com/images/embedded/2009/06/mems-gyroscope1.jpg>>
- FYZMATIK. 2008. Gyroskop. *Fyzmatik pise* [online]. 30.9.2008 [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://fyzmatik.pise.cz/76205-gyroskop.html>>
- JEREMIC, F. 2012. Derivation of Equations of Motion for Inverted Pendulum Problem. [online]. 1 - 22, 28.11.2012 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <<http://www.cas.mcmaster.ca/~qiao/courses/cs4xo3/presentations/InvPend.pdf>>
- KALMAN FILTER. 2001. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter)>
- LAUSZUS, K.; JESPERSEN, T. 2013. About Balanduino. *Balanduino* [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <<http://www.balanduino.net/about-balanduino>>
- MAELE VAN DE, P. 2013. The Complementary Filter. *Pieter-jan.com* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <<http://www.pieter-jan.com/node/11>>
- NĚMEC, Z. 2002. *Prostředky automatického řízení - elektrické: Studijní opora pro kombinovanou formu bakalářského studia oboru Aplikovaná informatika a řízení*. Vysoké učení technické v Brně.
- NOVÁK, P. 2005. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 247 s. ISBN 80-730-0141-1.
- NOVÁK, P. 2009. Lasery a moderní fyzika. *Zaměření katedry, Katedra fyziky - Fakulta stavební ČVUT* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://departments.fsv.cvut.cz/k102/vyuka/lasery-moderni-fyzika?prezentace>>
- PIPONI, D. 2011. Equibot the Balancing Robot. [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <<http://homepage.mac.com/sigfpe/Robotics/equibot.html>>
- PULZNĚ ŠÍŘKOVÁ MODULACE. 2001. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 4. 11. 2013 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B\\_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1\\_modulace](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace)>
- ROBOTEM SEM, ROBOTEM TAM II. 2011. *Robodoupě* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <<http://robodoupe.cz/2011/robotem-sem-robotem-tam-ii-%E2%80%93-elektronika-take-neni-k-zahozeni/>>
- ROZSÍVAL, P. 2011. Akcelerometry [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://vyuka.pavelrozsival.cz/isame/Akcelerometry.pdf>>

- SEGWAY. 2012. SegwayPT: Jak funguje Segway PT? [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <<http://www.segwaypt.cz/segway-funkce>>
- SENZORY PRO PRŮMYSL. 2012. Ultrazvukové senzory. *Senzory pro průmysl* [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <<http://www.senzory-pro-prumysl.cz/index.php/ultrazvukove-senzory>>
- STEJNOSMĚRNÝ MOTOR. 2013. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 9. 3. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Stejnospm%C4%9Brn%C3%BD\\_motor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Stejnospm%C4%9Brn%C3%BD_motor)>
- ŠTEFL, D. 2012. Dálkové ovládání pro interaktivní televizi. *Digizone* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://www.digizone.cz/clanky/dalkove-ovladani-pro-interaktivni-televizi/>>
- VOJÁČEK, A. 2006. Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS. *Automatizace* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006010401>>
- VOJÁČEK, A. 2007a. Principy akcelerometrů - 1. díl – Piezoelektrické. *Automatizace* [online]., roč. 1, č. 1 [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>>
- VOJÁČEK, A. 2007b. Principy akcelerometrů - 2. díl – Piezorezistivní. *Automatizace* [online]. roč. 1, č. 2 [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>>
- VOJÁČEK, A. 2007c. Co je to Kalmanova filtrace ?. *Automatizace* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007042901>>
- VOJÁČEK, A. 2009. Integrované MEMS gyroskopy. *Automatizace* [online]. roč. 1, č. 1 [cit. 2014-03-27]. Dostupné na: <<http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>>
- WINKLER, Z. 2005. Měření rychlosti. *Robotika*. [online]. 2005-11-10 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <<http://robotika.cz/guide/filtering/cs>>



## Příloha A – Zdrojový kód

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include <math.h>
#define M1_p1 4;//piny pro ovládání motorů
#define M1_p2 5;
#define M2_p1 6;
#define M2_p2 7;
#define Enable_A 2;
#define Enable_B 3;

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
    #include "Wire.h"
#endif

MPU6050 accelgyro;
const int ACC_X=A0; //piny pro čtení analogových hodnot z akcelerometru
const int ACC_Z=A2;

int16_t gx, gy, gz = 0.0;

double cas=0;
float gy_uhel= 0.0;
float T, T1, T2= 0.0;
float gy_min = 0.0;
float gyro_celk_uhel = 0.0;
//použité proměnné pro akcelerometr
int acc_x_raw=0,acc_y_raw=0,acc_z_raw=0;
double center_x=0,center_y=0,center_z=0;
double acc_y=0.0,acc_x=0.0,acc_z=0.0;
float radian = 0.0;
double uhel_vychyleni= 0.0;
```

```

double uhel_vychyleni2=0.0;
double a=0.98;
//proměnné pro Kálmánuv filtr
double Kalman_filtr_akcelerace=0;
double K=0.9,P=0.9,Q=0.1,R=1;
double prumer_min=0,prumer_akt=0;
double Kalman_filtr_gyroskop=0;
double K1=0.9,P1=0.9,Q1=0.1,R1=1;
double prumer_min1=0,prumer_akt1=0;
//proměnné pro PID resp. PSD regulátor
double kp=0.054,Ti=0.9312,Td=0.0328;
double W=0; //žádaná hodnota
double E_min=0, E_akt=0;
double U=0; //akční zásah
float Umax=10;
float S =0;
int min_uhel = 2;// minimální úhel kdy se nic nedělá
int pwmvalue = 0;
#define OUTPUT_READABLE_ACCELGYRO
#define LED_PIN 13
bool blinkState = false;

//hlavní nastavení programu
void setup() {
  pinMode(10,OUTPUT);
  pinMode(11,OUTPUT);
  pinMode(4,OUTPUT);
  pinMode(5,OUTPUT);
  pinMode(6,OUTPUT);
  pinMode(7,OUTPUT);

  #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
    Wire.begin();

```

```

#elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
    Fastwire::setup(400, true);
#endif
Serial.begin(115200);//rychlost seriové linky
analogReference(EXTERNAL);//referenční napětí 3,3 V
accelgyro.initialize();
pinMode(ACC_X,INPUT);//pin bude povazovan za vstupni
pinMode(ACC_Z,INPUT);
//cteni hodnoty z pinu akcelerometr pro kalibraci
center_x = (double)analogRead(ACC_X) * 3.3 / 1023;
center_z = (double)analogRead(ACC_Z) * 3.3 / 1023;

Serial.println("Testing device connections...");
Serial.println(accelgyro.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" :
"MPU6050 connection failed");
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
}

//Havní smyčka programu
void loop() {
    cas=millis();
    T1=cas/1000;
    //nacteni hodnot z akcelerometru
    acc_x_raw = analogRead(ACC_X);
    acc_z_raw = analogRead(ACC_Z);
    //prepocet na realne g
    acc_x = ((double)acc_x_raw * 3.3 / 1023 - center_x ) / 0.8;
    acc_z = (((double)acc_z_raw * 3.3 / 1023 - center_z ) / 0.8)+1;
    radian=acc_x/acc_z;
    uhel_vychyleni=atan(radian)*180.0/(1*PI);//prepocet na stupne
// Serial.print("akcelerometr : ");
// Serial.print(uhel_vychyleni);

```

```

//Kalmanova filtrace akcelerometr
P=P+Q;
prumer_akt=prumer_min+K*(uhel_vychyleni-prumer_min);
K=P/(P+R);
P=(1-K)*P;
Kalman_filtr_akcelerace=prumer_akt;
prumer_min=prumer_akt;
// Serial.print("Kalman acc  ");
// Serial.print(Kalman_filtr_akcelerace);

//gyroskop
accelgyro.getRotation(&gx, &gy, &gz);
gy += 904,8173913;
gy=gy/131;
//delay(20);
#ifdef OUTPUT_READABLE_ACCELGYRO
    //Serial.print("gyro : ");
    //Serial.print(gy);
    //Serial.print("  ");
#endif
//vypocet integralu pres lichobeznikove pravidlo
gy_uhel=T*((gy+gy_min)/2);
gy_min = gy;
gy=0;
#ifdef OUTPUT_BINARY_ACCELGYRO
    Serial.write((uint8_t)(gy >> 8)); Serial.write((uint8_t)(gy & 0xFF));
#endif
blinkState = !blinkState;
digitalWrite(LED_PIN, blinkState);

//komparacni filtr sloucení hodnoty gyro + acc
uhel_vychyleni2 = a*(uhel_vychyleni2+gy_uhel) + (1-a)*Kalman_filtr_akcelerace;

```

```

Serial.print(uhel_vychyleni2);
Serial.print(" ");

//PID regulator
E_min=E_akt;
E_akt=W-uhel_vychyleni2; //e=w-y
S = S + ((E_akt+E_min)/2);
U=kp*E_akt+T/Ti*S+Td/T*(E_akt-E_min);//rovnice PSD
Serial.println(U);

// výpis hodnot
// Serial.print(" ");
// Serial.print(" ");
// Serial.print(" gyroskop : ");
// Serial.println(gyro_celk_uhel);
// Serial.print(" [°] ");
// Serial.print(" perioda : ");
// Serial.println(T*1000);
// Serial.println(" [ms]");

if(U>Umax)//kladny
pwmvalue=255;
if(U<-Umax)//zaporny
pwmvalue=255;
//
if(uhel_vychyleni2 > 5 && uhel_vychyleni2 < -5){//zaporny
pwmvalue= 255;
}
//
if(U<Umax && U>0.0){//Kladny akční zásah
pwmvalue= (U/Umax)*255;
}
if(U>-Umax && U<0.0){//zaporny

```

```

    pwmvalue= (U/Umax)*255*-1;
    }
    if(uhel_vychyleni2 < min_uhel && uhel_vychyleni2 > -min_uhel)
    {
    U=0;
    S = 0;}
    //pwm pin 10 a 11
    //vynulovaní všech motoru
    digitalWrite(4, LOW);
    digitalWrite(5, LOW);
    digitalWrite(6, LOW);
    digitalWrite(7, LOW);
    if( U > 0.0){

    //motory vpřed
    digitalWrite(4, HIGH);
    digitalWrite(5, LOW);
    digitalWrite(6, LOW);
    digitalWrite(7, HIGH);
    analogWrite(10,pwmvalue);
    analogWrite(11,pwmvalue);
    }

    if( U < 0.0){
    //motory vzad
    digitalWrite(4, LOW);
    digitalWrite(5, HIGH);
    digitalWrite(6, HIGH);
    digitalWrite(7, LOW);
    analogWrite(10,pwmvalue);
    analogWrite(11,pwmvalue);
    }
    T= T1 -T2;

```

```
        T2 = T1;  
    }  
}  
//Konec programu, zpět na začátek cyklu
```





## **Příloha C – CD**

### **Obsah adresáře:**

KadlecT\_KonstrukceAŘízeníNestabilníhoPodvozkuMobilníhoRobotu\_LH\_2014.pdf – vlastní text práce v souboru pdf.

### **Složka software:**

Balanční robot .pde – zdrojový kód balančního robota

Funkce otoč se().pde – funkce otáčející robota

Funkce hledej překážku().pde – funkce hledající překážku

Balanční robot.avi – video balancujícího robota v prostoru